

# **Bachelorarbeit**

Herr  
**Tom Georgi**

## **Aufbau und Untersuchung eines Demonstrators zur aktiven Schallminderung in Abgaskanälen**

Mittweida, 2014



# **Bachelorarbeit**

## **Aufbau und Untersuchung eines Demonstrators zur aktiven Schallminderung in Abgaskanälen**

Autor:  
Herr

**Tom Georgi**

Studiengang:  
**Physikalische Technik**

Seminargruppe:  
**PT11wA-B**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt**

Zweitprüfer:  
**Dipl.-Ing. Christian Schulze**

Einreichung:  
**Mittweida, 10.10.2014**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2014**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Georgi, Tom:

Aufbau und Untersuchung eines Demonstrators zur aktiven Schallminderung in Abgaskanälen. 2014. 41 Seiten, 42 Abbildungen, 1 Tabelle. Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik. Anfertigung der Arbeit bei der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH. Bachelorarbeit, 2014

## **Referat:**

Aktive Systeme zur Schallfeldbeeinflussung (ANC-Systeme) basieren auf dem Interferenzeffekt während der Ausbreitung von Schallwellen. Die Schallemissionen von Blockheizkraftwerken (BHKW), wie sie zunehmend bei der dezentralen Energieversorgung in Gebäuden eingesetzt werden, stellen eine Herausforderung an den Schallschutz dar. Der Einsatz von ANC-Systemen ist für diese Problemstellung erfolgversprechend.

Um die dominierenden, tieffrequenten Anteile im Spektrum der Abgasgeräusche von Verbrennungsmotoren zu minimieren, wurde ein Demonstrator eines aktiven Schalldämpfers entwickelt. Dabei wurde der Einfluss der Mikrofonpositionen im Abgasrohr sowie von Parametern innerhalb des Adaptionalgorithmus auf die Einfügungsdämpfung und die Stabilität des ANC-Systems untersucht.

# Inhalt

## Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielstellung .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
3.1 Schallausbreitung im Rohr .....	5
3.2 Einteilung von Schalldämpfern .....	7
3.3 ANC-Systeme .....	9
3.4 Adaptive Digitalfilter.....	10
3.5 LMS-Algorithmus.....	13
3.6 Das verwendete ANC-System .....	15
<b>4 Messergebnisse .....</b>	<b>17</b>
4.1 Messungen am modifizierten Impedanzrohr .....	17
4.2 Messungen mit aktiven Schalldämpfer .....	19
4.2.1 Sinustöne und Terzrauschen.....	20
4.2.2 Schallausbreitung im Rohr bei 315 Hz.....	22
4.2.3 Variation der Parameter und Optimierung im tiefen Frequenzbereich.....	24
4.2.4 Variation der Mikrofonabstände .....	26
4.2.5 Optimierung des ANC-Systems für Motorgeräusch .....	27
<b>5 Diskussion .....</b>	<b>31</b>
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>35</b>
<b>Literatur</b>	<b>37</b>
<b>Anlagen, Teil 1: ANC-System .....</b>	<b>IX</b>

---

<b>Anlagen, Teil 2: Weitere Messungen .....</b>	<b>XI</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>XV</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>XVII</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schalldruckpegelspektren verschiedener BHKW [Schulze, 2014].....	3
Abbildung 2: Theoretisch erreichbare Pegelminderungen in Abhängigkeit von Pegel- u. Phasendifferenz [Möser, 2012].....	9
Abbildung 3: Einkanaliges feedforward-ANC-System für breitbandige Störgeräusche.....	10
Abbildung 4: Einkanaliges feedforward-ANC-System für schmalbandige Störgeräusche	10
Abbildung 5: FIR-Filterstruktur [Weinzierl, 2008] .....	11
Abbildung 6: FIR-basiertes adaptives Filter, modifiziert nach Weinzierl [2008] .....	12
Abbildung 7: Fehlerfläche bei $N = 2$ Gewichten, modifiziert nach Moschytz [2000].....	13
Abbildung 8: feedforward ANC-System mit Kompensation von $S(z)$ und $F(z)$ .....	15
Abbildung 9: Skizze des modifizierten Impedanzrohres.....	17
Abbildung 10: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3, Störsignal: Sinus, Referenzmikrofon an R1 .....	18
Abbildung 11: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3, Störsignal: Sinus, Referenzmikrofon an R2 .....	18
Abbildung 12: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3, Störsignal: Terzrauschen, Referenzmikrofon an R1 .....	19
Abbildung 13: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3, Störsignal: Terzrauschen, Referenzmikrofon an R2 .....	19
Abbildung 14: Spektrale Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon, Störsignal: Sinus .....	20
Abbildung 15: Spektraler Schalldruckpegelverlauf an beiden Mikrofonen, Quelle: Primärquelle .....	20
Abbildung 16: Spektraler Schalldruckpegelverlauf an beiden Mikrofonen, Quelle: Sekundärquelle .....	21

Abbildung 17: Vergleich des Schalldruckpegelverlaufs bei Weißem Rauschen (WR) mit der spektralen Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon (DE) .....	21
Abbildung 18: Vergleich der Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon mit der Einfügungsdämpfung im Raum, Störgeräusch: Terzrauschen.....	22
Abbildung 19: Simulation der Wellenausbreitung im Rohr, schwarz: Position des Referenzmikrofons, rot: Position des Fehlermikrofons, Störgeräusch: Sinus mit $f = 315$ Hz, Mündungsöffnung bei $x = 1,42$ m .....	22
Abbildung 20: Signal am Fehlermikrofon, Störgeräusch: Sinus mit $f = 315$ Hz, Mündungsöffnung bei $1,42$ m.....	23
Abbildung 21: Simulation der Wellenausbreitung im Rohr, schwarz: Position des Referenzmikrofons, rot: Position des Fehlermikrofons, Störgeräusch: Sinus mit $f = 315$ Hz, Mündungsöffnung bei $x = 1,69$ m .....	23
Abbildung 22: Signal am Fehlermikrofon, Störgeräusch: Sinus mit $f = 315$ Hz, Mündungsöffnung bei $1,69$ m.....	24
Abbildung 23: Signal am Fehlermikrofon bei Variation von $\alpha$ und $N$ , Störgeräusch: Sinus mit $f = 315$ Hz, Länge des Rohres: $1,42$ m .....	24
Abbildung 24: Spektrale Einfügungsdämpfung bis $f = 200$ Hz am Fehlermikrofon bei den Grundeinstellungen und bei Variation von $\alpha$ , $N$ und $f_s$ , Störsignal: Sinus.....	25
Abbildung 25: Spektrale Einfügungsdämpfung bis $f = 200$ Hz am Fehlermikrofon bei den Grundeinstellungen und bei Variation von $\alpha$ , $N$ und $f_s$ , Störsignal: Terzrauschen .....	25
Abbildung 26: Vergleich der spektralen Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon mit und ohne Einhaltung der Kausalitätsbedingung, Störsignal: Terzrauschen .....	26
Abbildung 27: Spektrale Einfügungsdämpfung bis $f = 200$ Hz am Fehlermikrofon unter Einhaltung der Kausalitätsbedingung, Störsignal: Sinus.....	27
Abbildung 28: Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon bei verschiedenen Einstellungen, Motorgeräusch .....	27
Abbildung 29: Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon bei verschiedenen Einstellungen mit vorgeschaltetem Absorptionsschalldämpfer, Motorgeräusch.....	28



Abbildung 30: Ausschnitt des Signals am Fehlermikrofon bei Einstellung mit größter Einfügungsdämpfung, Motorgeräusch.....	29
Abbildung 31: Spektrale Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon bei Einstellung mit größter Einfügungsdämpfung, Motorgeräusch.....	29
Abbildung 32: Frequenzgang und Impedanz des ANC-Lautsprechers.....	IX
Abbildung 33: Aktiver Schalldämpfer.....	IX
Abbildung 34: Amplitudengang des innerhalb des Algorithmus programmierten Tiefpasses .....	X
Abbildung 35: Vergleich der Einfügungsdämpfungen mit und ohne Mittelstück im modifizierten Impedanzrohr, Referenzmikrofon an R2, Fehlermikrofon an E1, Störgeräusch: Sinus .....	XI
Abbildung 36: Vergleich der Einfügungsdämpfungen mit und ohne Mittelstück im modifizierten Impedanzrohr, Referenzmikrofon an R2, Fehlermikrofon an E1, Störgeräusch: Terzrauschen .....	XI
Abbildung 37: Zeitsignal und Spektrum des aufgenommenen Motorgeräuschs.....	XII
Abbildung 38: Signal am Fehlermikrofon mit und ohne algorithmisch realisiertem Tiefpass-Filter, Motorgeräusch .....	XII
Abbildung 39: $F(z)$ – Koeffizienten im eingeschwungenen Zustand.....	XIII
Abbildung 40: $S(z)$ - Koeffizienten im eingeschwungenen Zustand .....	XIII
Abbildung 41: Durchgangsdämpfung des passiven Schalldämpfers.....	XIII
Abbildung 42: Simulation des Fehlersignals bei Variation des Konvergenzparameters $\mu_s$ .....	XIV



# Abkürzungsverzeichnis

## Abkürzungen

ANC	Active Noise Cancellation (dt.: aktive Lärminderung)
ASD	Aktiver Schalldämpfer
BHKW	Blockheizkraftwerk
DE	Einfügungsdämpfung
DSV	Digitale Signalverarbeitung
E	Fehlermikrofonposition
FIR	Finite Impulse Response (dt.: endliche Impulsantwort)
FXLMS	Filtered-x LMS-Algorithmus
IIR	Infinite Impulse Response (dt.: unendliche Impulsantwort)
LMS	Least-Mean-Squares-Algorithmus
LTI-System	Linear-Time-Invariant-System (dt.: lineares zeitinvariantes System)
MSE	Mean Squared Error (dt.: mittlerer quadratischer Fehler)
NLMS	Normierter LMS-Algorithmus
R	Referenzmikrofonposition
V	Verstärkungsfaktor
WR	Weißes Rauschen

## Formelzeichen

$\omega$	Kreisfrequenz in Hz
$\Delta L$	Pegelminderung in dB
$\mu$	Schrittweite
$\mu_s$	Konvergenzparameter
$A$	Querschnittsfläche in m <sup>2</sup>
$c$	Luftschallgeschwindigkeit in m·s <sup>-1</sup>
$d$	Rohrdurchmesser in m
$d(n)$	zeitdiskretes Soll-Ausgangssignal
$d_0$	Durchmesser des Kugelstrahlers in m
$e(n)$	zeitdiskretes Fehlersignal
$F(z)$	Übertragungsfunktion des akustischen Feedbacks
$f_{c.o.}$	cut-off-Frequenz in Hz

$f_s$	Abtastfrequenz in Hz
$\underline{G}(n)$	Momentangradient
$h$	Filterkoeffizienten
$L_{diff}$	Pegeldifferenz in dB
$n$	Zeitschritt
$N$	Filterlänge
$p$	Schalldruck in Pa
$r$	Reflexionsfaktor
$S(z)$	Übertragungsfunktion des Sekundärpfades
$\underline{v}$	Schallschnelle in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$\underline{w}(n)$	Gewichtsvektor
$x(n)$	zeitdiskretes Eingangssignal
$y(n)$	zeitdiskretes Ausgangssignal
$\underline{Z}$	Impedanz in $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
$\alpha$	Vergessensfaktor
$\beta$	Phasenkonstante in $\text{m}^{-1}$
$\gamma$	Ausbreitungskonstante in $\text{m}^{-1}$
$\delta$	Dämpfungskonstante in $\text{m}^{-1}$
$\varepsilon$	Sicherheitskonstante
$\Phi$	Phasendifferenz in rad
$\Omega$	Raumwinkelmaß

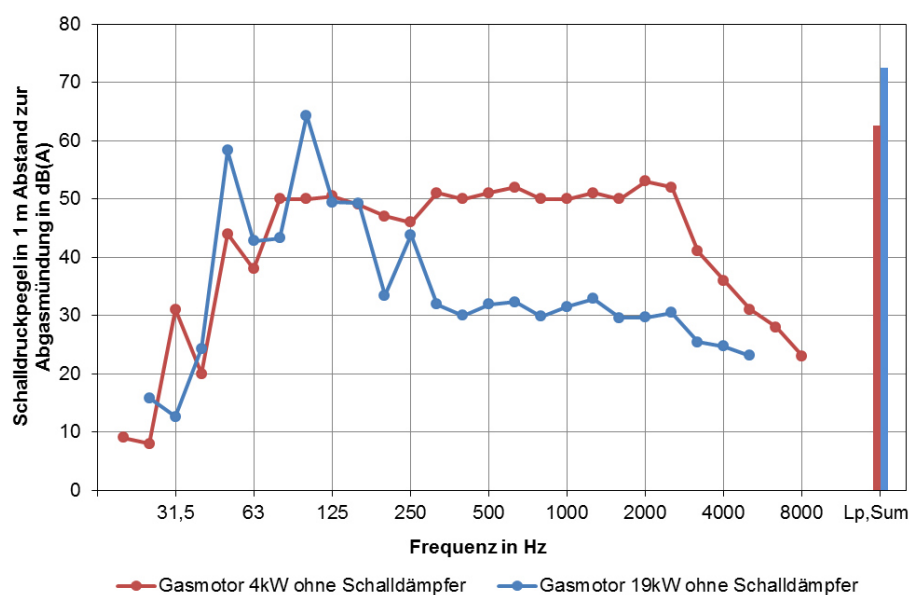
# 1 Einleitung

Eine Hauptaufgabe der Technischen Akustik ist die Reduzierung der Lärmbelastung durch Maschinen und Anlagen. Unterschieden wird dabei der primäre und sekundäre Lärmschutz. Alle Techniken zur Konstruktion einer lärmarmen Maschine gehören zu den primären Maßnahmen. Darin wird die Schallentstehung direkt an der Quelle gemindert. Stellen primäre Maßnahmen keinen zu hohen technischen Aufwand dar, sollten diese stets zur Anwendung kommen. Sekundäre Lärmschutzmaßnahmen bewirken Pegelminderungen auf dem Schallausbreitungsweg oder am Immissionsort. In der Praxis oft eingesetzte sekundäre Verfahren sind Maschinenkapselung und das Installieren von Schalldämpfern in einem Zu- oder Abluftkanal einer Maschine. Der nachträgliche Einbau von Schalldämpfern erfordert dessen korrekte Dimensionierung entsprechend der spektralen Zusammensetzung des erzeugten Schalls. Für die Minderung hochfrequenter Schallanteile können herkömmliche Schalldämpfer bei entsprechender Auslegung sehr wirkungsvoll und wirtschaftlich sein. Um tiefe Frequenzen zu dämpfen wird die damit verbundene, notwendige Einbautiefe jedoch oft zum Problem. An diesem Punkt setzt die Entwicklung und Optimierung aktiver Maßnahmen an. Diese nutzen zur Beeinflussung eines Schallfelds ein zusätzliches, künstlich erzeugtes Schallfeld. Das Prinzip funktioniert vorrangig für den Frequenzbereich unterhalb von 500 Hz bei vergleichsweise geringem Platzbedarf. Die Unterdrückung von störenden Geräuschen durch aktive Maßnahmen bezeichnet man als aktive Lärminderung (ANC). Das Schallfeld der Störquelle wird als primäres, und das der Gegenschallquelle als sekundäres Schallfeld bezeichnet. Im Idealfall entspricht der Sekundärschall dem phaseninvertierten Primärschall gleicher Amplitude, sodass sich die Feldgrößen beider Wellen aufgrund destruktiver Interferenz auslöschen. Die Sekundärquelle wirkt in diesem Fall wie ein schallweicher Reflektor, an dessen Ort der Schalldruck zu null wird [Trimpop, 2003]. Voraussetzung für eine Minderungswirkung ist daher eine möglichst genaue, negative Reproduktion des Primärschalls. Je nach Amplituden- und Phasengenauigkeit in der Nachbildung ergeben sich unterschiedlich hohe Pegelminderungen. Die Wirkung des ANC-Systems kann dabei auf einer Beeinflussung der hydrodynamischen Nahfeldwirkung (Quellnachbildung), auf Interferenzerscheinungen während der Ausbreitung oder beidem beruhen [Schubert, 2011]. In der Industrie werden bereits Kombinationen aus aktiven und passiven Schalldämpfern, sog. Hybridschalldämpfer, eingesetzt. Einschränkungen dieser Systeme liegen meistens darin, dass deren Wirkung von der Einbausituation abhängig ist oder lediglich für tonale Störgeräusche Pegelminderungen erreicht werden.



## 2 Zielstellung

Bei der dezentralen Energieversorgung von Wohn- und Geschäftshäusern werden zunehmend Blockheizkraftwerke (BHKW) eingesetzt. Die Abgasgeräusche der eingebauten Verbrennungsmotoren stellen eine Herausforderung an den Schallschutz dar. Diese werden maßgebend durch tiefe Frequenzanteile bestimmt. Abbildung 1 zeigt die vom Hersteller gemessenen Schalldruckpegelspektren am Beispiel von BHKW mit Gasmotoren unterschiedlicher Leistungen.



**Abbildung 1: Schalldruckpegelspektren verschiedener BHKW [Schulze, 2014]**

Durch den dauerhaften Betrieb eines BHKW-Motors stellt der emittierte Schall bei unzureichendem Schallschutz eine Lärmbelästigung dar. Der Einbau passiver Schallschutzelemente für tiefe Frequenzen ist mit einem hohen Platzbedarf und Materialaufwand verbunden, weshalb der Einsatz aktiver Schalldämpfer für diese Anwendung erfolgversprechend ist.

Ziel der Arbeit ist es, einen Demonstrator zur aktiven Schallminderung für tieffrequente Motorgeräusche zu entwickeln. Das System soll dabei adaptiv sein, um auf Veränderung des Störgeräuschs reagieren zu können. In Vorarbeit wurde von der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH ein Adaptionsalgorithmus für ANC-Systeme entwickelt. Im Hinblick auf eine dauerhafte Anwendung soll das System neben einer möglichst hohen Schalldämpfung ein hohes Maß an Stabilität besitzen. Dazu werden geeignete Mikrofonpositionen im Abgasrohr und der Einfluss von Parametern innerhalb des Algorithmus untersucht. Die sensiblen Komponenten des aktiven Schalldämpfers sollen kondensatbeständig und vor dauerhaften Temperaturen von 120°C geschützt sein.





### 3 Theoretische Grundlagen

#### 3.1 Schallausbreitung im Rohr

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Ausbreitung von ebenen Wellen. Die Grenzfrequenz für die Ausbildung der ersten Quermode in einem Rohr mit kreisförmigen Querschnitt berechnet sich gemäß DEGA [2006] näherungsweise nach (3.1.1).

$$f_{c.o.} = \frac{c}{\lambda_{max}} = 0,58 \cdot \frac{c}{d} \quad (3.1.1)$$

Darin sind  $f_{c.o.}$  die cut-off-Frequenz,  $c$  die Schallgeschwindigkeit im Rohr,  $\lambda_{max}$  die entsprechende Wellenlänge und  $d$  der Rohrdurchmesser. Für den in Abschnitt 4.2 verwendeten Kanal des aktiven Schalldämpfers beträgt  $f_{c.o.}$  ca. 2 kHz.

Der örtliche Verlauf von Schalldruck und Schallschnelle innerhalb des Rohres kann durch die folgenden Beziehungen beschrieben werden:

$$\underline{p}(x) = \underline{p}_e \cdot e^{-\gamma \cdot (x-x_0)} + \underline{p}_r \cdot e^{+\gamma \cdot (x-x_0)} \quad (3.1.2)$$

$$\underline{v}(x) = \frac{1}{\underline{Z}_S} \cdot \left( \underline{p}_e \cdot e^{-\gamma \cdot (x-x_0)} + \underline{p}_r \cdot e^{+\gamma \cdot (x-x_0)} \right) \quad (3.1.3)$$

Darin sind  $\underline{p}_e$  die Amplitude der sich in positive  $x$ -Richtung ausbreitenden Welle,  $\underline{p}_r$  die Amplitude der an der Stelle  $x_0$  reflektierten Welle und  $\underline{v}$  die komplexe Ausbreitungskonstante.  $\underline{Z}_S$  ist die spezifische Impedanz, das Verhältnis von Schalldruck und Schallschnelle im Rohr:

$$\underline{Z}_S = \frac{\underline{p}}{\underline{v}} \quad (3.1.4)$$

Am Rohrabschluss wird ein bestimmtes Amplitudenverhältnis von hin- und rücklaufender Welle entsprechend der Impedanz des Rohrabschlusses (sog. Wandimpedanz  $\underline{Z}_W$ ) erzwungen. Dieses Amplitudenverhältnis heißt Reflexionsfaktor, der sich nach dem Anpassungsgesetz berechnen lässt:

$$\underline{r} = \frac{\underline{p}_r}{\underline{p}_e} = \frac{\underline{Z}_W - \underline{Z}_S}{\underline{Z}_W + \underline{Z}_S} \quad (3.1.5)$$

$$\underline{Z}_W = \frac{\underline{p}(x_0)}{\underline{v}(x_0)} \quad (3.1.6)$$

Bei einer schallharten Begrenzung ( $\underline{Z}_W \rightarrow \infty$ ) ist  $\underline{r} = 1$  und es bildet sich an der Grenzfläche ein Druckbauch und ein Schnelleknoten aus. In regelmäßigen Abständen von

$$(2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.1.7)$$

befindet sich vor der Grenzfläche ein Druckknoten, und in den Abständen

$$n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.1.8)$$

ein Schnelleknoten. Bei einer schallweichen Begrenzung ( $\underline{Z}_W \rightarrow 0$ ) ist  $\underline{r} = -1$  und es kommt zur Ausbildung eines Druckknotens und eines Schnellebauchs an der Grenzfläche. Gleichung (3.1.7) gilt für Schnelleknoten und Gleichung (3.1.8) für Druckknoten.

Für den Fall, dass die Wellenlängen im Rohr größer sind als der Rohrdurchmesser, lässt sich die Impedanz des offenen Rohrabchlusses näherungsweise durch die Impedanz eines Kugelstrahlers 0. Ordnung nach (3.1.9) beschreiben [Sinambari, 2008].

$$\underline{Z}_W = \frac{p_{x_o}}{v_{x_o}} = j(\rho \cdot c) \cdot \frac{\frac{\pi \cdot d_0}{\lambda}}{1 + j \cdot \frac{\pi \cdot d_0}{\lambda}} \quad (3.1.9)$$

Durch Einsetzen von  $\underline{Z}_W$  und  $\underline{Z}_S$  in (3.1.5) ergibt sich der komplexe Reflexionsfaktor zu:

$$\underline{r} = -\frac{1}{1 + j \cdot \frac{\pi \cdot d_0}{\lambda}} \quad (3.1.10)$$

Aus (3.1.10) ist erkennbar, dass der Betrag des Reflexionsfaktors mit größer werdender Wellenlänge steigt, d.h. tiefe Frequenzen werden stärker reflektiert als hohe Frequenzen. Der Durchmesser des Kugelstrahlers  $d_0$  lässt sich durch Gleichsetzen des Schallflusses am Mündungsquerschnitt  $A$  und an der Kugeloberfläche berechnen:

$$A \cdot \underline{v} = \Omega \cdot \frac{d_0^2}{4} \cdot \underline{v} \quad (3.1.11)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\Omega}} \quad (3.1.12)$$

Darin ist  $\Omega$  das Raumwinkelmaß, das beim Austritt in einen Raum  $4\pi$  beträgt.

Die komplexe Ausbreitungskonstante  $\underline{\gamma}$  in (3.1.2) setzt sich aus einer Dämpfungskonstante  $\delta$  und einer Phasenkonstante  $\beta$  zusammen:

$$\underline{\gamma} = \delta + j\beta = \delta + j\frac{\omega}{c} \quad (3.1.13)$$

Für  $\delta = 0$  erhält man eine verlustfreie Schallausbreitung.

## 3.2 Einteilung von Schalldämpfern

Ein Schalldämpfer ist definitionsgemäß nach [EN ISO 14163] eine Vorrichtung zur Verminderung der Schallübertragung durch einen Kanal, ein Rohr oder eine Öffnung ohne Unterbindung des Mediumtransportes. Sie lassen sich nach den jeweils dominierenden Dämpfungsmechanismen unterteilen, wobei die Grenzen zwischen den Gruppen fließend sein können:

### (1) Absorptionsschalldämpfer

Die schalldämpfende Wirkung beruht hauptsächlich auf der Reibung der Fluidteilchen an porösen oder faserigen Kanalauskleidungen. Die kinetische Energie der schwingenden Teilchen wird dabei teilweise in Wärme umgewandelt. Man bezeichnet diesen Effekt als Dissipation. Da die physikalische Ursache für die dabei hergestellte Einfügungsdämpfung nach Möser [2012] bei entsprechender Wandimpedanz auch Reflexion sein kann, werden diese Schalldämpfer als Wandungsschalldämpfer bezeichnet. Kennzeichnend für diesen Typ sind eine breitbandige Wirkung und ein geringer Druckverlust.

### (2) Reaktive Schalldämpfer

Dieser Oberbegriff bezieht sich auf Schalldämpfer, die die auftreffenden Schallwellen nicht schlucken, sondern mit dem anliegenden Schallfeld in Wechselwirkung treten [Müller, 2004].

#### (a) Resonanzschalldämpfer

Es wird zwischen Helmholtz- und Lambda-Viertel-Resonatoren unterschieden. Bei Helmholtz-Resonatoren handelt es sich um Feder-Masse-Systeme. Durch die auftreffenden Schallwellen wird das System zum Mitschwingen angeregt und Schwingungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt [Henn, 2008]. Lambda-Viertel-Resonatoren sind Wellenleiter, die eine Resonanz aufweisen, wenn deren Länge ein Viertel der Wellenlänge entspricht. Die Wirksamkeit eines Resonanzschalldämpfers beschränkt sich auf einen schmalen Frequenzbereich, kann durch streifende Strömung nachlassen und unter ungünstigen Bedingungen auch negativ werden, sodass ein tonales Geräusch entsteht [EN ISO 14163].

### (b) Reflexionsschalldämpfer

Die Wirkungsweise besteht in der einfachen oder mehrfachen Reflexion des Schalls durch eine plötzliche Impedanzänderung. Reflexionsschalldämpfer sind oft sehr widerstandsfähig gegen mechanische Einwirkungen wie z.B. Staub und starke Schwingungen. Nachteilig sind ein vergleichsweise hoher Druckverlust und das Vorhandensein von Frequenzbereichen geringerer oder gar keiner Dämpfung.

### (3) Aktive Schalldämpfer

Im Gegensatz zu den vorher genannten passiven Schalldämpfertypen wirkt ein aktiver Schalldämpfer durch Interferenz des unerwünschten Schalls mit einem durch steuerbare Hilfsschallquellen erzeugten Gegenschall [EN ISO 14163]. Daher kann ein aktiver Schalldämpfer relativ einfach an das Schallfeld angepasst werden. In der Literatur wird der Begriff aktiv gelegentlich für adaptive passive Schalldämpfer, wie z.B. ein Helmholtz-Resonator mit variablen Luftvolumen, verwendet. Im Folgenden wird der Begriff aktiv nur im Zusammenhang mit einem steuerbaren elektroakustischen System (bestehend aus Mikrofon, Lautsprecher und digitaler Signalverarbeitungseinheit (DSV-Einheit)) verwendet.

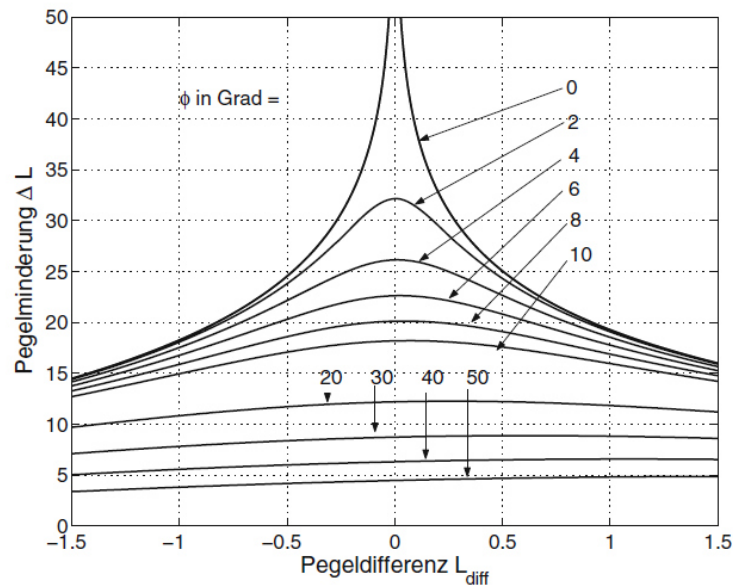
Die erreichbare Pegelminderung durch Verwendung eines aktiven Schalldämpfers ist stets durch die vorhandenen Ungenauigkeiten bei der Nachbildung des primären Schallfeldes begrenzt. Möser [2012] stellt für die erreichbare Pegelminderung in Abhängigkeit der Schalldruckamplituden und der Phasendifferenz zwischen primären und sekundären Schallfeld folgende Abschätzung an:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg \left( \frac{p_P^2}{|p_{ges}^2|} \right) dB = -10 \cdot \lg \left( 1 + \frac{p_S^2}{p_P^2} - 2 \cdot \frac{p_S}{p_P} \cdot \cos \Phi \right) dB \quad (3.2.1)$$

Darin sind  $p_P$  und  $p_S$  die Amplituden der Primär- bzw. Sekundärschallwelle und  $\Phi$  die Phasendifferenz. Das Amplitudenverhältnis lässt sich durch die Pegeldifferenz

$$L_{diff} = L_P - L_S = 20 \cdot \lg \left( \frac{p_P}{p_S} \right) dB \quad (3.2.2)$$

ausdrücken. In Abbildung 2 sind die theoretisch erreichbaren Pegelminderungen nach (3.2.1) für unterschiedliche Pegel- und Phasendifferenzen  $L_{diff}$  bzw.  $\Phi$  dargestellt. Für eine Minderung des Schalldruckpegels um 20 dB ist eine maximale Phasendifferenz von  $\Phi = 8^\circ$  (bei  $L_{diff} = 0$  dB) und eine maximale Pegeldifferenz von  $L_{diff} < 1$  dB (bei  $\Phi = 0^\circ$ ) notwendig. Diese Betrachtung gilt für Sinustöne. Im praktischen Einsatz ist eine hohe Genauigkeit in der Nachbildung aller dominierenden Anteile im Frequenzspektrum des Primärschallfeldes notwendig.

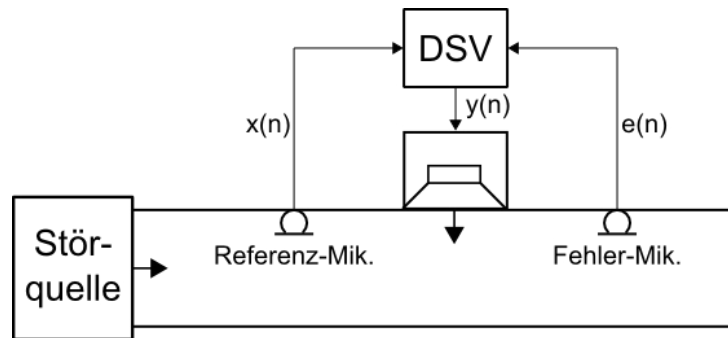


**Abbildung 2: Theoretisch erreichbare Pegelminderungen in Abhängigkeit von Pegel- u. Phasendifferenz [Möser, 2012]**

### 3.3 ANC-Systeme

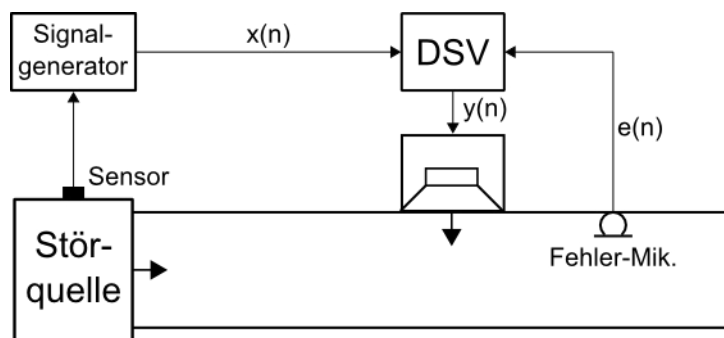
ANC-Systeme lassen sich in feedback- und feedforward-Systeme einteilen. Der Unterschied besteht in der Art, wie das Schallfeld der Störquelle (Primärschallfeld) aufgenommen wird: Bei einem feedforward-System wird das Primärschallfeld durch einen Sensor aufgenommen, der sich vor der Gegenschallquelle (Sekundärquelle) befindet. Bei einem feedback-System verzichtet man auf diesen Sensor. Darin wird das Primärschallfeld aus dem Gesamtschallfeld herausgerechnet, was sich nach der Sekundärquelle durch Interferenz beider Wellenfelder einstellt. Feedback-Systeme sind für die Unterdrückung schmalbandiger Störgeräusche geeignet und werden bereits erfolgreich in ANC-Kopfhörern eingesetzt. Ihr Vorteil besteht in den geringeren geometrischen Abmaßen verglichen mit einem feedforward-System [Hirayama, 2009].

Der Vorteil von feedforward-Systemen ist die vielseitigere Anwendbarkeit. Beispielsweise lassen sich auch breitbandige Störgeräusche mit zufälliger Signalcharakteristik mindern. Der Aufbau für diese Anwendung ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Geräusch der Störquelle wird durch das Referenzmikrofon aufgenommen und der DSV-Einheit zur Berechnung des Ausgangssignals  $y(n)$  zugeführt. Das Fehlermikrofon nimmt das Gesamtschallfeld auf und liefert das Fehlersignal  $e(n)$  zur Optimierung des ANC-Systems. Ist das System nicht kausal, d.h. ist die Verzögerung des Systems größer als die Laufzeit der Schallwelle vom Referenzmikrofon zum Ort der Sekundärquelle, so lassen sich mit diesem System nur schmalbandige oder periodische Geräusche mindern [Kuo, 1999].



**Abbildung 3: Einkanaliges feedforward-ANC-System für breitbandige Störgeräusche**  
Referenzsignal  $x(n)$ , Filterausgang  $y(n)$ , Fehlersignal  $e(n)$

Das in Abbildung 4 dargestellte System ist ein Spezialfall des Systems, das in Abbildung 3 gezeigt wird. Es eignet sich für periodische Störgeräusche, die z.B. durch Verbrennungsmotoren verursacht werden. Der nicht-akustische Sensor detektiert die Rotation der Maschine und liefert Informationen zur Bildung eines Referenzsignals, dass die Grundfrequenz und alle harmonischen Vielfachen des Störgeräuschs enthält [Kuo, 2008].



**Abbildung 4: Einkanaliges feedforward-ANC-System für schmalbandige Störgeräusche**  
Referenzsignal  $x(n)$ , Filterausgang  $y(n)$ , Fehlersignal  $e(n)$

Je nach Beschaffenheit des zu minimierenden Schallfeldes kann man jedes ANC-System als Mehrkanal-System auslegen. Für die eindimensionale Wellenausbreitung im Rohr unterhalb der *cut-off*-Frequenz ist ein Einkanal-System ausreichend, während für ein komplexeres Wellenfeld meist ein mehrkanaliges System mit mehreren Sekundärquellen und Sensoren verwendet wird.

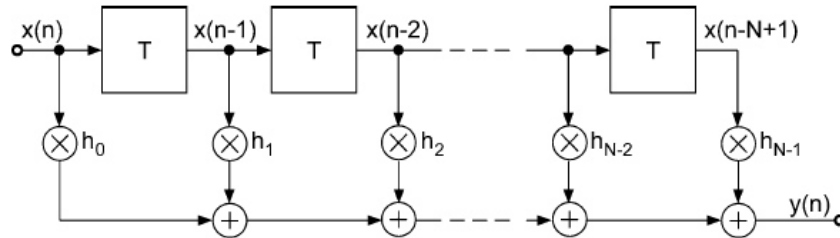
### 3.4 Adaptive Digitalfilter

Ein Filter verändert bestimmte Frequenzkomponenten des Eingangssignals, indem diese beispielsweise unterdrückt, verstärkt oder in der Phase verschoben werden. Bekannte Filterfunktionen sind Hochpass, Tiefpass, Bandpass und Bandsperre. Bei einem Digitalfil-

ter erfolgt die Verarbeitung der Signale zeit- und wertdiskret. Aus einer Folge von Eingangswerten  $x(n)$  wird eine Folge von Ausgangswerten  $y(n)$  berechnet [Grünigen, 2014].

Man unterscheidet Digitalfilter mit endlich langer und unendlich langer Impulsantwort (FIR- bzw. IIR-Filter). Bei IIR-Filtern handelt es sich um rekursive Systeme, d.h. das Ausgangssignal wird abgegriffen und zurückgekoppelt. Der aktuelle Wert des Ausgangssignals ist von endlich vielen vorherigen Ausgangswerten abhängig. Aufgrund dieser Rückkopplungen ist die Impulsantwort unendlich lang, wodurch diese Systeme instabil werden können. Bei FIR-Filtern handelt es sich um nichtrekursive Systeme, d.h. es existieren nur vorwärts gerichtete Signalfade. Die Impulsantwort eines solchen Filters ist daher endlich lang und das FIR-Filter bleibt stets stabil [Meyer, 2011]. Aufgrund dieser Eigenschaft und in Verbindung mit der einfachen mathematischen Handhabung basieren die meisten adaptiven Digitalfilter und Adaptionalgorithmen auf der FIR-Filterstruktur.

Das Blockschaltbild eines FIR-Filters ist in Abbildung 5 dargestellt. Das Filter der Länge  $N$  berechnet zum Zeitpunkt  $n$  einen Ausgangswert  $y(n)$ . Dabei werden die Abtastwerte des Eingangssignals  $x(n), \dots, x(n-N+1)$  mit den entsprechenden Filterkoeffizienten  $h_0, h_1, \dots, h_{N-1}$  multipliziert und die Produktterme aufsummiert. Der Rechenaufwand beträgt damit  $N+1$  Multiplikationen und  $N$  Additionen. Die Verarbeitung der sequentiell abgespeicherten Abtastwerte erfolgt dabei in Zeitschritten der Dauer  $T = 1/f_s$  ( $f_s$  = Abtastfrequenz des Eingangssignals).



**Abbildung 5: FIR-Filterstruktur [Weinzierl, 2008]**  
Eingangssignal  $x(n), \dots, x(n-N+1)$ , Filterkoeffizienten  $h_0, h_1, \dots, h_{N-1}$ , Ausgangssignal  $y(n)$

Der Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangssignal ist in (3.4.1) gegeben.

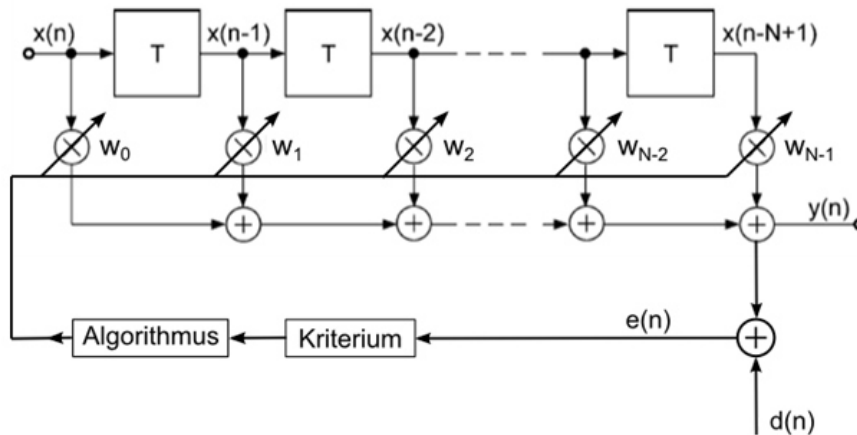
$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cdot x(n-k) \quad (3.4.1)$$

Gleichung (3.4.1) wird als zeitdiskrete Faltungssumme bezeichnet [Weinzierl, 2008].

Die Koeffizienten eines FIR-Filters entsprechen den Abtastwerten von dessen Impulsantwort und bestimmen die zu realisierende Filterfunktion. Beim Entwurf eines zeitinvarianten Filters werden die Koeffizienten entsprechend der Filterfunktion festgelegt und während

des Betriebs nicht geändert. Das Filter gehört zu den linearen und zeitinvarianten Systemen (LTI-Systeme) [Meyer, 2011].

Bei einem adaptiven Filter sind die Koeffizienten hingegen variabel. Sie werden im Zusammenhang mit adaptiven Filtern oft als Gewichte  $w(n)$  bezeichnet. Die Gewichte werden durch einen Algorithmus angepasst, bis ein optimaler Satz an Filtergewichten entsprechend eines festzulegenden Kriteriums berechnet ist. Abbildung 6 zeigt das Blockschaltbild eines FIR-basierten adaptiven Filters.



**Abbildung 6: FIR-basiertes adaptives Filter, modifiziert nach Weinzierl [2008]**  
Eingangssignal  $x(n), \dots, x(n-N+1)$ , Filtergewichte  $w_0, w_1, \dots, w_{N-1}$ , Ausgangssignal  $y(n)$ , Soll-Ausgangssignal  $d(n)$ , Fehlersignal  $e(n)$

Bei der Berechnung des Ausgangssignals  $y(n)$  wird dem Filter zusätzlich ein Soll-Ausgangssignal  $d(n)$  vorgegeben. Im Sinne der aktiven Lärminderung entspricht dieses dem phasengedrehten Eingangssignal gleicher Amplitude. Aufgrund der Bereitstellung eines Soll-Ausgangssignals wird dieser Adaptionsprozesses als überwachtes Lernen bezeichnet.

Nach Moschytz [2000] lässt sich die Faltungssumme in (3.4.1) durch Zusammenfassung der  $N$  Gewichte und den  $N$  Werten des Eingangssignals zu Vektoren

$$\underline{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), w_2(n), \dots, w_{N-1}(n)] \quad (3.4.2)$$

$$\underline{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)] \quad (3.4.3)$$

als einfaches Skalarprodukt schreiben:

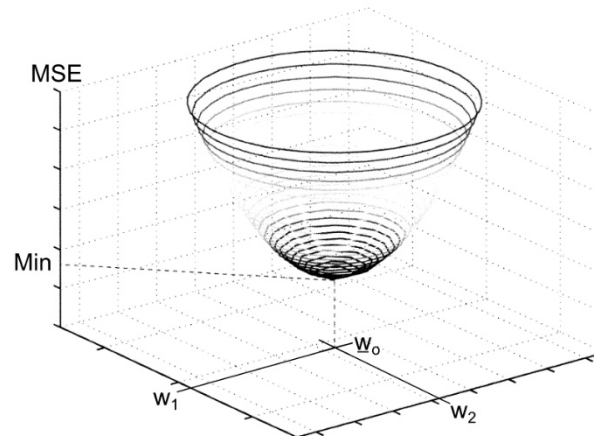
$$y(n) = \underline{x}^t(n) \cdot \underline{w}(n) = \underline{w}^t(n) \cdot \underline{x}(n) \quad (3.4.4)$$

Darin ist  $\underline{w}(n)$  der Gewichtsvektor und  $\underline{x}(n)$  der Eingangssignalvektor. Die Differenz zwischen beiden Signalen ist das Fehlersignal  $e(n)$ :



$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \underline{w}^t(n) \cdot \underline{x}(n) \quad (3.4.5)$$

Das Fehlersignal geht in den Adaptionsalgorithmus ein. Als Kriterium für die Anpassung wird dabei oft der mittlere quadratische Fehler  $E\{e^2(n)\}$  (MSE) herangezogen, den es zu minimieren gilt. Der MSE lässt sich als Funktion der Filtergewichte darstellen. Bei einem Filter der Länge  $N$  entsteht dabei ein Paraboloid in  $N+1$  Dimensionen, der als Fehlerfläche bezeichnet wird. Die Fehlerfläche nimmt für den optimalen Gewichtsvektor  $\underline{w}_o$  ein eindeutig globales Minimum an (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Fehlerfläche bei  $N = 2$  Gewichten, modifiziert nach Moschytz [2000]**

Durch die Variabilität der Gewichte ist die Übertragungsfunktion eines adaptiven Filters zeitvariant und das Filter stellt kein LTI-System dar. Adaptive Filter werden jedoch als linear bzw. nichtlinear bezeichnet, wenn das Ausgangssignal eine lineare bzw. nichtlineare Funktion des Eingangssignals ist [Moschytz, 2000].

### 3.5 LMS-Algorithmus

Ein bekannter Adaptionsalgorithmus für lineare adaptive FIR-Filter ist der Least-Mean-Squares-Algorithmus (LMS-Algorithmus) aus der Gruppe der Gradienten-Suchalgorithmen. Diese suchen die Fehlerfläche (Abbildung 7) auf ihr globales Minimum ab. Dazu wird für den aktuellen Gewichtsvektor  $\underline{w}(n)$  ein Korrekturterm ermittelt, welcher den darauf folgenden Gewichtsvektor  $\underline{w}(n+1)$  dem Optimum  $\underline{w}_o$  annähert. Der Korrekturterm wird aus dem negativen Gradienten

$$\nabla \underline{w} \{ E\{e^2(n)\} \} \quad (3.5.1)$$

gebildet. Darin ist  $\nabla$  der Nabla-Operator, dessen Komponenten die Operatoren für die jeweils erste Ableitung sind. Bei der Herleitung des LMS-Algorithmus wird von der Rekursionsgleichung des Gradientenverfahrens ausgegangen:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) - c \cdot \nabla \underline{w} \{ E\{e^2(n)\} \} \quad (3.5.2)$$

Darin wird der aktuelle Gewichtsvektor um den mit  $c$  gewichteten Gradienten korrigiert. Der Schritt zum LMS-Algorithmus besteht in der Approximation dieses Gradienten, so dass keine Kenntnis über die Statistik der Signale mehr vorausgesetzt werden muss. Die Schätzung erfolgt aus den Werten des Ein- und Ausgangssignals, indem der Gradient durch einen Momentangradienten  $\underline{G}(n)$  ersetzt wird:

$$\underline{G}(n) = \nabla \underline{w} \{ e^2(n) \} \quad (3.5.3)$$

$$\begin{aligned} &= \nabla \underline{w} \left\{ [d(n) - \underline{w}^t \cdot \underline{x}(n)]^2 \right\} \\ &= -2 \cdot \underline{x}(n) \cdot (d(n) - \underline{w}^t \cdot \underline{x}(n)) \\ &= -2 \cdot \underline{x}(n) \cdot e(n) \end{aligned} \quad (3.5.4)$$

Der Momentangradient  $\underline{G}(n)$  ergibt sich somit aus dem Eingangsvektor  $\underline{x}(n)$ , gewichtet mit dem doppelten negativen Fehlerwert  $-2 \cdot e(n)$ . Durch Ersetzen des Gradienten in (3.5.2) mit  $\underline{G}(n)$  erhält man:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) - c \cdot \underline{G}(n) = \underline{w}(n) + 2 \cdot c \cdot \underline{x}(n) \cdot e(n) \quad (3.5.5)$$

Die positive Konstante  $c$  wird durch die Schrittweite  $\mu = 2 \cdot c$  ersetzt und es ergibt sich die Rekursionsformel zur Aufdatierung des Koeffizientenvektors nach dem LMS-Algorithmus:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) + \mu \cdot e(n) \cdot \underline{x}(n) \quad (3.5.6)$$

Die Schrittweite ist der Anteil des Momentangradienten, der bei jeder Iteration dem aktuellen Gewichtsvektor hinzugefügt wird. Sie bestimmt daher die Zeit, die der Algorithmus braucht um zu konvergieren. Mit einer größeren Schrittweite verringert sich die Konvergenzzeit. Eine zu große Schrittweite kann den Algorithmus instabil werden lassen, d.h. es wird keine Lösung gefunden. Die obere Grenze für die Schrittweite nach Moschytz [2000] ist in (3.5.7) gegeben.

$$0 < \mu < \mu_{max} = \frac{2}{N \cdot E\{x^2(n)\}} \quad (3.5.7)$$

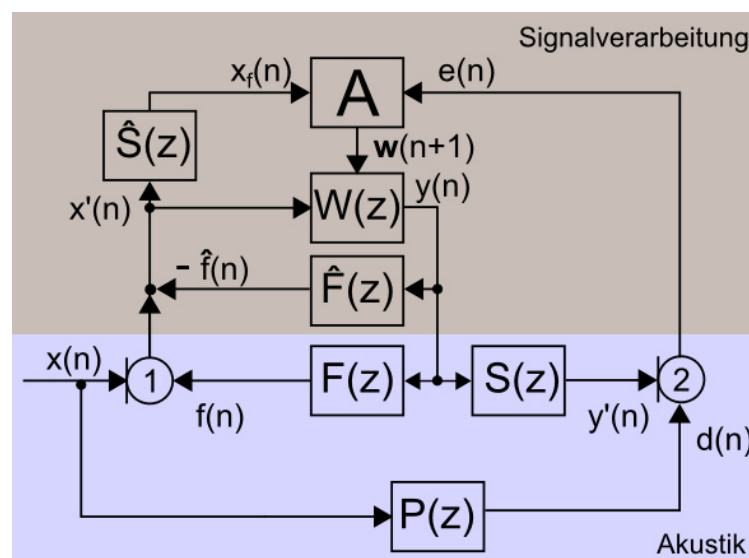
Darin ist  $E\{x^2(n)\}$  die mittlere Leistung des Eingangssignals, die sich durch eine zeitliche Mittelung schätzen lässt. Wenn die Eingangssignalleistung starken Schwankungen unterliegt, ist es vorteilhaft, die Schrittweite laufend an die momentane Eingangssignalleistung anzupassen. Ein LMS-Algorithmus mit einer adaptiven Schrittweite  $\mu = \mu(n)$  heißt Normierter LMS-Algorithmus (NLMS). Nach Moschytz [2000] ergibt sich für die adaptive Schrittweite  $\mu(n)$  unter Einhaltung der Grenze in (3.5.7) folgende Rechenvorschrift:

$$\mu(n) = \frac{\mu_s}{\varepsilon + \underline{x}^t(n) \cdot \underline{x}(n)} \quad 0 < \mu_s < 2 \quad (3.5.8)$$

Darin sind  $\mu_s$  der Konvergenzparameter,  $\varepsilon$  eine kleine Sicherheitskonstante um die Division durch Null verhindern und  $\underline{x}^t(n) \cdot \underline{x}(n)$  die Schätzung der momentanen Eingangsleistung.

### 3.6 Das verwendete ANC-System

Der Aufbau des ANC-Systems entspricht der feedforward-Variante (Abbildung 3). Darin sind zwei Effekte zu beachten. Zum einen breitet sich der Sekundärschall in beide Richtungen aus, wodurch das Referenzmikrofon die Schallfelder beider Quellen aufnimmt. Dieser Effekt wird als akustisches Feedback  $F(z)$  bezeichnet. Zum anderen spielt die Übertragungsfunktion vom Filterausgang zum Fehlermikrofon für die Berechnung des Sekundärschalls eine wichtige Rolle. Diese Übertragungsfunktion heißt Sekundärpfad  $S(z)$  und beinhaltet akustische Einflüsse (Schallausbreitung vom Sekundärlautsprecher zum Fehlermikrofon) und Einflüsse der Signalverarbeitung (A/D- und D/A Wandlung, Verstärker, usw.). Die Kompensation von  $F(z)$  und  $S(z)$  erfolgt durch den Einsatz der Filter  $\hat{F}(z)$  und  $\hat{S}(z)$ , deren Koeffizienten in einem Initialisierungstraining vor dem Betrieb bestimmt werden. Abbildung 8 zeigt das Signalfussdiagramm des verwendeten ANC-Systems. Dem Algorithmus A wird das mit  $\hat{F}(z)$  und  $\hat{S}(z)$  gefilterte Eingangssignal  $x_f(n)$  zur Berechnung der Filtergewichte zugeführt. Handelt es sich um einen LMS-Algorithmus, so spricht man in diesem Fall von einem FXLMS-Algorithmus (filtered-x LMS).



**Abbildung 8: feedforward ANC-System mit Kompensation von  $S(z)$  und  $F(z)$**   
 Referenzmikrofon (1); Fehlermikrofon (2); akustischer Pfad  $P(z)$ ; adaptives Filter  $W(z)$ ; Algorithmus A; Feedbackfilter  $\hat{F}(z)$ ;  
 Sekundärpfad-Filter  $\hat{S}(z)$ , [Kluth, 2014]

In den Untersuchungen von Kluth [2014] findet sich eine Gegenüberstellung der Eigenschaften von ANC-Algorithmen. Hinsichtlich Stabilität und Adaptivität ist ein FXLMS mit

adaptiver Schrittweite (NFXLMS) am geeignetsten (Anlagen, Teil 1, Tabelle 1). Zusätzliche Stabilität wird durch einen Vergessensfaktor  $\alpha$  erreicht. Dieser verhindert einen unkontrollierten Anstieg der Filtergewichte und ein mögliches Übersteuern der Sekundärschallquelle. Ein LMS-Algorithmus mit Vergessensfaktor wird als Leaky-LMS-Algorithmus bezeichnet. Ein Leaky-LMS-Algorithmus besitzt eine kürzere Konvergenzzeit als ein LMS-Algorithmus. Dem entgegen steht eine größere Amplitude des Fehlersignals im eingeschwungenen Zustand. Bei dem verwendeten Adaptionalgorithmus handelt es sich um einen Leaky-NFXLMS mit Feedbackunterdrückung. Die Aktualisierung der Filtergewichte erfolgt in Anlehnung an (3.5.6) nach folgender Rechenvorschrift:

$$\underline{w}(n+1) = (1 - \alpha) \cdot \underline{w}(n) + \mu(n) \cdot e(n) \cdot \underline{x}_f(n) \quad (3.6.1)$$

## 4 Messergebnisse

Als Maß für die Wirksamkeit des ANC-Systems dient die Einfügungsdämpfung  $DE$ :

$$DE = 20 \cdot \log \left( \frac{\tilde{u}_{ohne}}{\tilde{u}_{mit}} \right) \text{ dB} \quad (4.0.0)$$

Dabei ist  $\tilde{u}_{ohne}$  der Effektivwert des Signals bei ausgeschaltetem ANC-System und  $\tilde{u}_{mit}$  der Effektivwert des Signals mit eingeschaltetem ANC-System, gemessen am Fehlermikrofon.

### 4.1 Messungen am modifizierten Impedanzrohr

Um geeignete Mikrofonpositionen für den interessierenden Frequenzbereich zu finden, wurden Messungen mit einem bereits vorhandenen, modifizierten Impedanzrohr durchgeführt. Dieses besteht aus zwei Schallquellen und zwei Mikrofonen, deren Position veränderbar ist (Abbildung 9).

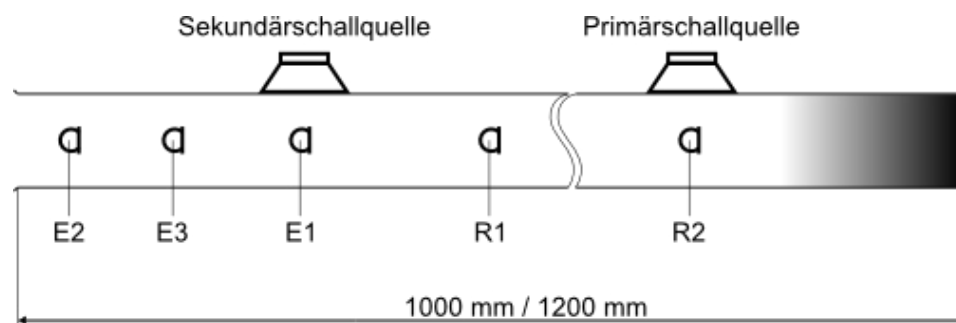
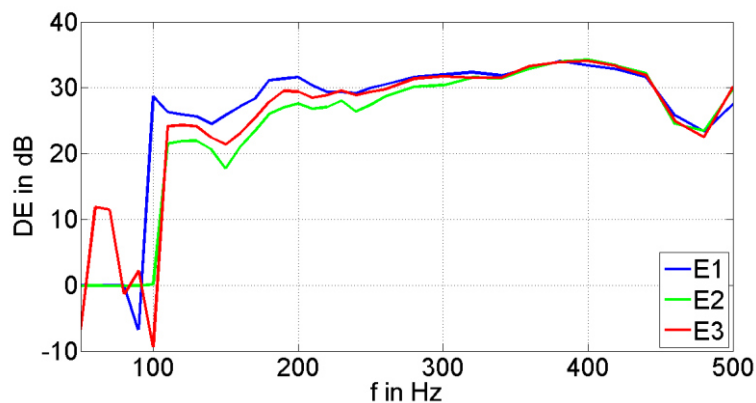


Abbildung 9: Skizze des modifizierten Impedanzrohres

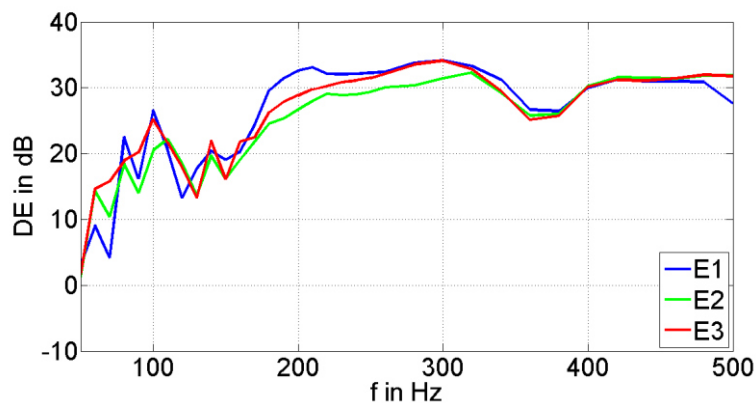
Darin sind E1, E2 und E3 die möglichen Positionen des Fehlermikrofons und R1 bzw. R2 die Positionen des Referenzmikrofons. Das Rohr ist einseitig absorbierend abgeschlossen und mittig um 20 cm erweiterbar. Die Gesamtlänge beträgt entsprechend 100 cm bzw. 120 cm. Als Störgeräusche wurden einzelne Sinustöne im Frequenzabstand von 10 Hz sowie Terzbandrauschen verwendet. Gemessen wurde im Frequenzbereich von 50 bis 500 Hz. Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen die Messungen mit der kürzeren Rohrlänge (100 cm).

Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die Einfügungsdämpfungen bei verschiedenen Mikrofonpositionen für Sinustöne. Ab 200 Hz aufwärts werden die größten Einfügungsdämpfungen bis zu 35 dB erreicht. Für den Bereich unterhalb 200 Hz ist die Wirkung geringer. Bei Mikrofonposition R1 gibt es unterhalb 100 Hz keine Minderungswirkung. Die Einfügungsdämpfung wird in diesem Bereich teilweise negativ, d.h. es kommt zu einer

Verstärkung der emittierten Schallleistung. Bei Verwendung von Mikrofonposition R2 ist die Wirkung bei tiefen Frequenzen ebenfalls geringer, bleibt jedoch positiv.



**Abbildung 10: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3, Störsignal: Sinus, Referenzmikrofon an R1**



**Abbildung 11: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3, Störsignal: Sinus, Referenzmikrofon an R2**

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die Einfügungsdämpfungen bei verschiedenen Mikrofonpositionen für Terzbandrauschen. Die pegelmindernde Wirkung ist im Vergleich mit Sinustönen geringer. Maximale Einfügungsdämpfungen zwischen 15 und 22 dB werden im Frequenzbereich zwischen 150 und 200 Hz erreicht. Mit größeren Frequenzen (steigende Bandbreite) nimmt die Dämpfung ab. Für den Frequenzbereich unter 100 Hz kommt es bei beiden Positionen des Referenzmikrofons zu negativen Einfügungsdämpfungen.

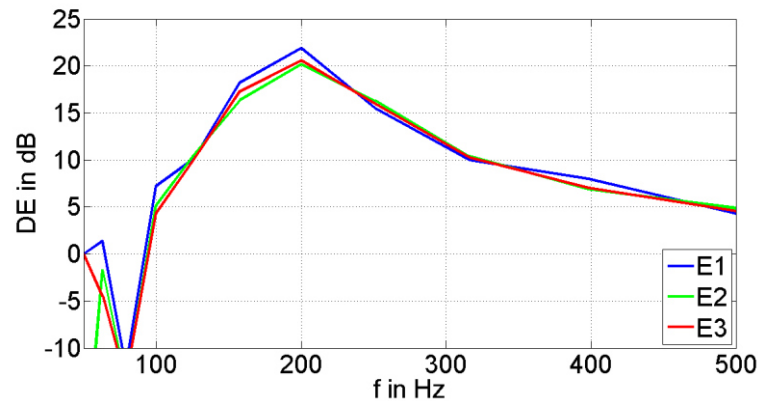


Abbildung 12: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3,  
Störsignal: Terzrauschen, Referenzmikrofon an R1

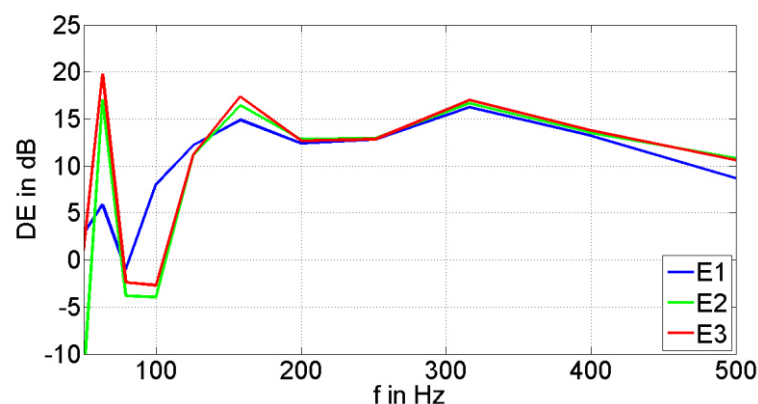


Abbildung 13: Spektrale Einfügungsdämpfung an E1, E2 und E3,  
Störsignal: Terzrauschen, Referenzmikrofon an R2

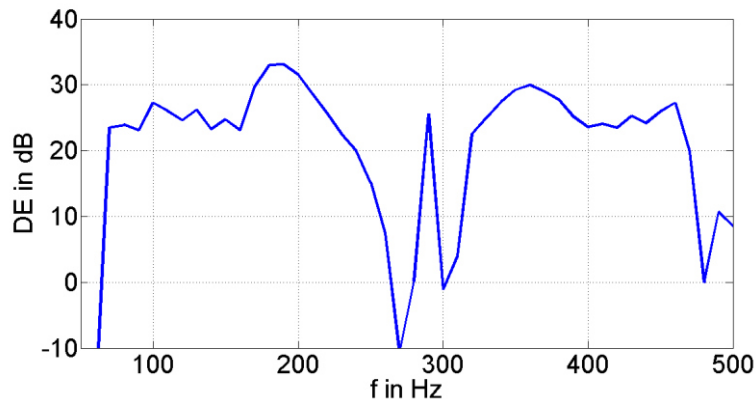
Bei Verwendung der Position R2 verhielt sich das ANC-System im Frequenzbereich unter 100 Hz im Vergleich mit R1 stabiler. Der Abstand zwischen den Positionen R2 und E1 betrug bei der kürzeren Rohrlänge ca. 40 cm. Durch Einbringung des Mittelstücks (Verlängerung des Rohres auf 120 cm) konnte bei Sinustönen und Terzrauschen keine Erhöhung der Einfügungsdämpfung festgestellt werden (Anlagen, Abbildung 35 und Abbildung 36).

## 4.2 Messungen mit aktiven Schalldämpfer

Beim Aufbau des Demonstrators wurden die im vorhergehenden Abschnitt erhaltenen Messergebnisse mit dem modifizierten Impedanzrohr berücksichtigt. Da die Einfügungsdämpfungen der Mikrofonpositionen E1, E2 und E3 ähnlich verlaufen, wurde das Fehlermikrofon direkt vor dem Sekundärlautsprecher positioniert. Das Referenzmikrofon befindet sich ca. 40 cm vor dem Fehlermikrofon. Die Gesamtlänge des Rohres beträgt 1,42 m.

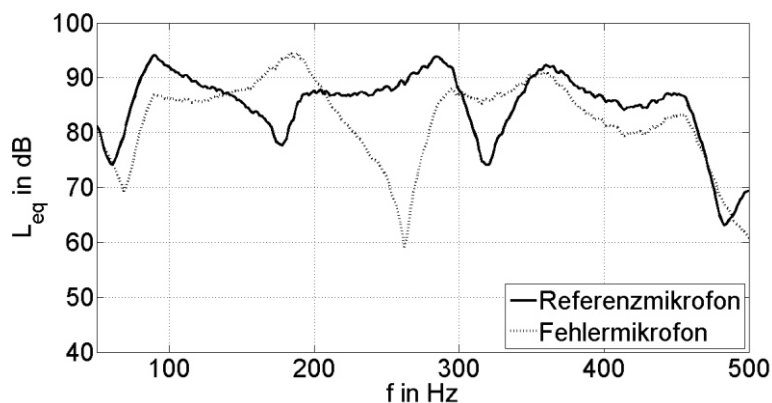
### 4.2.1 Sinustöne und Terzrauschen

Abbildung 14 zeigt die gemessene Einfügungsdämpfung für Sinustöne. Zu erkennen ist ein ungleichmäßiger Verlauf der Dämpfung. Zwischen den Bereichen hoher Einfügungsdämpfungen gibt es Einbrüche.



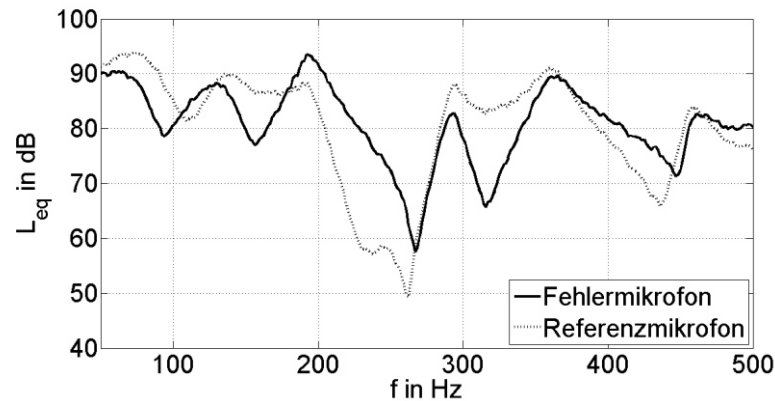
**Abbildung 14: Spektrale Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon, Störsignal: Sinus**

Um die Einbrüche in Abbildung 14 zu untersuchen, wurde mit jeder Schallquelle einzeln Weißes Rauschen erzeugt und die Signale an beiden Mikrofonen aufgenommen. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die spektralen Schalldruckpegelverläufe bei eingeschalteter Primär- bzw. Sekundärquelle. Bei Verwendung der Primärquelle ist das Signal am Referenzmikrofon - bei Verwendung der Sekundärquelle das Signal am Fehlermikrofon - schwarz eingetragen. In beiden Abbildungen sind Frequenzbereiche mit abwechselnd höherem und niedrigerem Schalldruck zu erkennen.



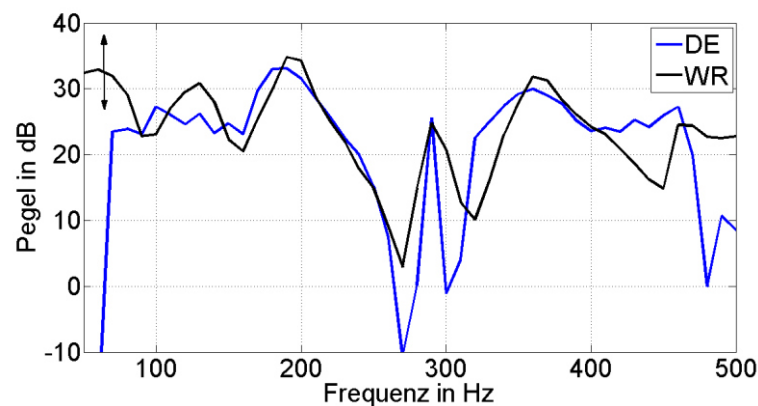
**Abbildung 15: Spektraler Schalldruckpegelverlauf an beiden Mikrofonen, Quelle: Primärquelle**





**Abbildung 16: Spektraler Schalldruckpegelverlauf an beiden Mikrofonen, Quelle: Sekundärquelle**

Abbildung 17 zeigt die Einfügungsdämpfung für Sinustöne (Abbildung 14) im Vergleich mit dem vertikal verschobenen Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon bei Verwendung der Sekundärquelle (Abbildung 16). Die größten Einbrüche beider Kurven im Bereich um 300 Hz liegen übereinander. Bei 480 Hz wird die Einfügungsdämpfung null. Bei dieser Frequenz erzeugt die Primärschallquelle den geringsten Schalldruck am Referenzmikrofon (Abbildung 15).



**Abbildung 17: Vergleich des Schalldruckpegelverlaufs bei Weißem Rauschen (WR) mit der spektralen Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon (DE)  
Quelle: Sekundärquelle**

Abbildung 18 zeigt die spektrale Einfügungsdämpfung für Terzrauschen. Zu Vergleichszwecken wurde die Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon und im Raum in einem Abstand von 1 m zur Mündungsöffnung gemessen. Mit steigender Frequenz bis 200 Hz nimmt die Einfügungsdämpfung im Raum und am Fehlermikrofon zu. Die Dämpfung im Raum ist bei Mittenfrequenzen ab 125 Hz stets geringer als am Fehlermikrofon. Deutlich zu erkennen ist der Einbruch der Einfügungsdämpfung bei 315 Hz. Die Einfügungsdämpfung bei 400 Hz von ca. 9 und 7 dB am Fehlermikrofon bzw. im Raum nimmt bei weiter steigenden Frequenzen ab.

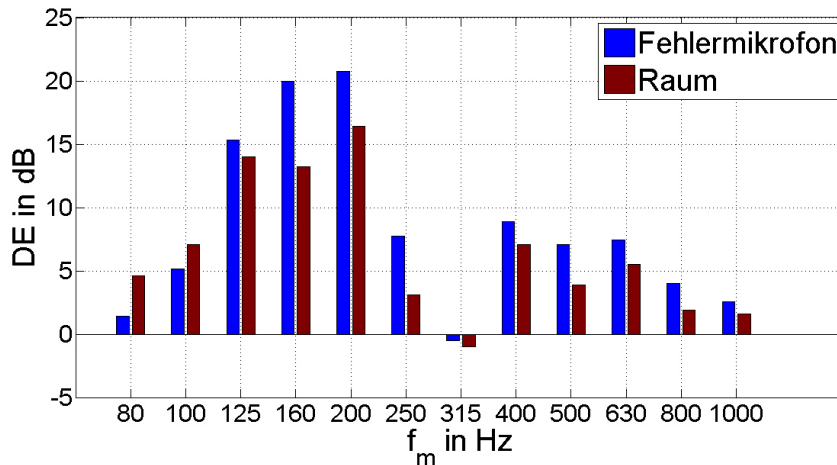


Abbildung 18: Vergleich der Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon mit der Einfügungsdämpfung im Raum, Störgeräusch: Terzrauschen

#### 4.2.2 Schallausbreitung im Rohr bei 315 Hz

Bei einer Sinus-Frequenz von 315 Hz zeigen die Pegelverläufe in Abbildung 15 und Abbildung 16 einen verminderten Schalldruck am Referenz- bzw. Fehlermikrofon. Im Folgenden wurde die Wellenausbreitung von der Primärschallquelle zur Mündungsöffnung für diese Frequenz beispielhaft simuliert. Die Simulation erfolgte gemäß den Betrachtungen in den theoretischen Grundlagen in Abschnitt 3.1. Zusätzlich wurde das Signal am Fehlermikrofon gemessen.

In Abbildung 19 ist die Wellenausbreitung bei einer Rohrlänge von 1,42 m dargestellt. Die Überlagerung von hin- und rücklaufender Welle führt zu einer stehenden Welle, in deren Knotenpunkt sich bei dieser Frequenz das Referenzmikrofon befindet. Die Lage des Knotenpunktes vor der Mündungsöffnung entspricht näherungsweise einer ganzen Wellenlänge (vgl. Gleichung (3.1.8) mit  $n = 2$ ).

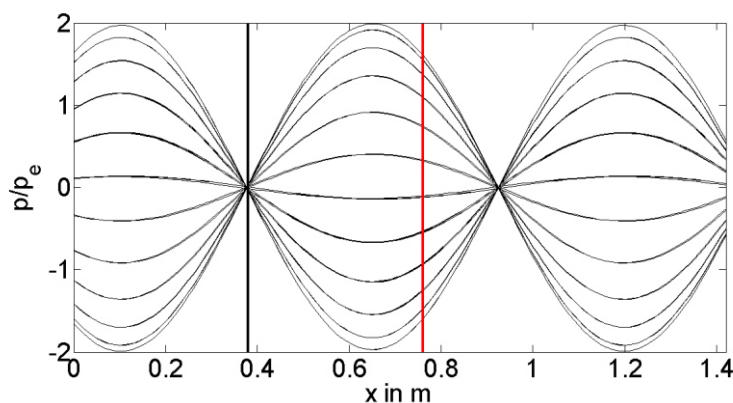
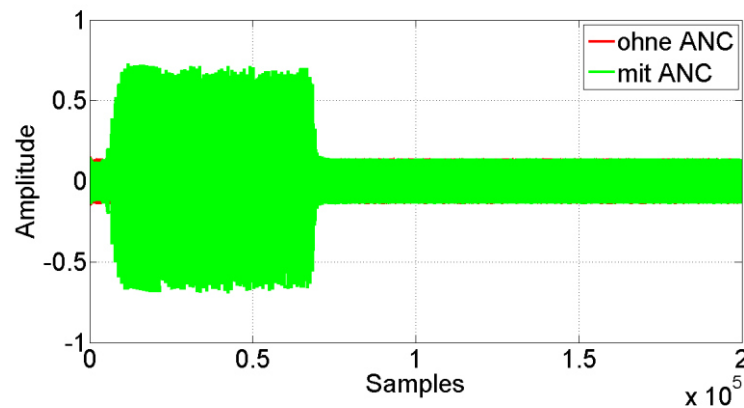


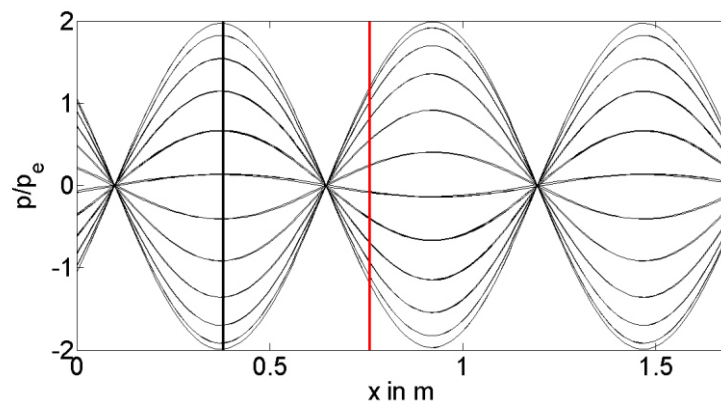
Abbildung 19: Simulation der Wellenausbreitung im Rohr, schwarz: Position des Referenzmikrofons, rot: Position des Fehlermikrofons, Störgeräusch: Sinus mit  $f = 315$  Hz, Mündungsöffnung bei  $x = 1,42$  m

Abbildung 20 zeigt das dazugehörige, gemessene Signal am Fehlermikrofon. Bei eingeschaltetem ANC-System schaukelt sich das System zunächst auf und stürzt anschließend ab.



**Abbildung 20: Signal am Fehlermikrofon, Störgeräusch: Sinus mit  $f = 315$  Hz, Mündungsöffnung bei 1,42 m**

Gemäß (3.1.7) befindet sich das Referenzmikrofon im Druckmaximum, wenn die Länge des Rohres um ein Viertel der Wellenlänge (bei 315 Hz ca. 27 cm) verändert wird. Abbildung 21 zeigt die simulierte Wellenausbreitung mit einer Rohrlänge von 1,69 m.



**Abbildung 21: Simulation der Wellenausbreitung im Rohr, schwarz: Position des Referenzmikrofons, rot: Position des Fehlermikrofons, Störgeräusch: Sinus mit  $f = 315$  Hz, Mündungsöffnung bei  $x = 1,69$  m**

In Abbildung 22 ist das gemessene Zeitsignal dargestellt, dass sich bei einer Verlängerung des Rohres um ca. 27 cm ergeben hat. Das Fehlersignal bei eingeschaltetem ANC-System nimmt von Beginn an stetig ab und erreicht nach ca. 100.000 Samples eine minimale Amplitude. Es ist keine Instabilität des Systems zu erkennen.

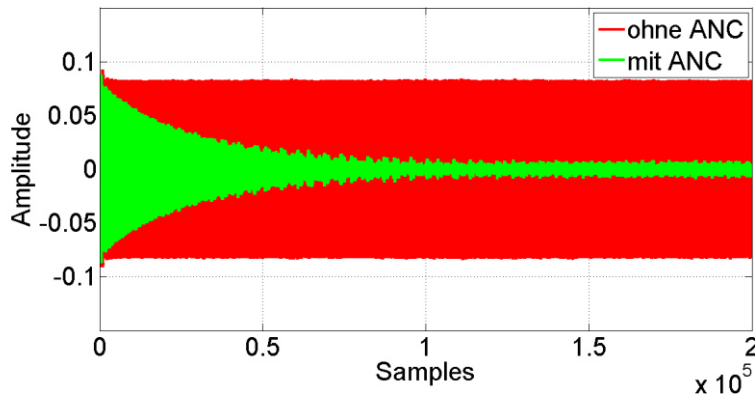


Abbildung 22: Signal am Fehlermikrofon, Störgeräusch: Sinus mit  $f = 315$  Hz, Mündungsöffnung bei 1,69 m

#### 4.2.3 Variation der Parameter und Optimierung im tiefen Frequenzbereich

Nach den theoretischen Betrachtungen in Abschnitt 3.6 wird die Stabilität des ANC-Systems durch einen Vergessensfaktor  $\alpha$  innerhalb des Algorithmus erhöht. Es hat sich gezeigt, dass sich durch Variation des Vergessensfaktors Systemabstürze wie in Abbildung 20 vermeiden lassen. Abbildung 23 vergleicht die Messungen des Fehlersignals mit einem Vergessensfaktor von  $10^{-5}$  und  $10^{-3}$ . Durch die Erhöhung des Vergessensfaktors bleibt ein Systemabsturz aus. In Kombination mit einer größeren Filterlänge  $N$  lässt sich eine geringe Minimierung des Fehlersignals erreichen.

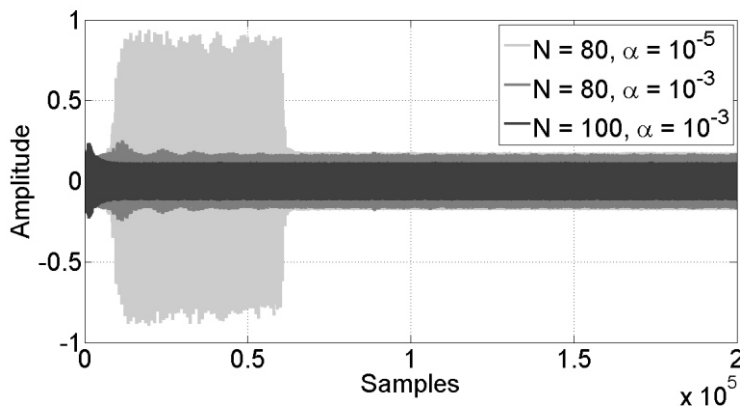


Abbildung 23: Signal am Fehlermikrofon bei Variation von  $\alpha$  und  $N$ , Störgeräusch: Sinus mit  $f = 315$  Hz, Länge des Rohres: 1,42 m

Als nächstes wurde untersucht, ob sich durch Variation des Vergessensfaktor  $\alpha$ , der Filterlänge  $N$  und der Abtastfrequenz  $f_s$  die Dämpfung im Frequenzbereich zwischen 50 und 200 Hz erhöhen lässt. Dazu wurden Messungen bei folgenden Einstellungen durchgeführt:

$\alpha'$ : Vergessensfaktor  $\alpha = 10^{-3}$

$N'$ : Filterlänge  $N = 100$

$f_s'$ : Abtastfrequenz  $f_s = 4$  kHz

In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die Einfügungsdämpfungen für Sinustöne bzw. Terzrauschen bei den vorgenommenen Einstellungen im Vergleich mit den Grundeinstellungen (blau) dargestellt. Bei den Grundeinstellungen werden die größten Einfügungsdämpfungen im Frequenzbereich oberhalb von 70 Hz bei Sinustönen, und oberhalb von 100 Hz bei Terzrauschen erreicht. Bei tieferen Frequenzen bricht die Dämpfung bei beiden Störgeräuschen ein. Dies ist bei den Messungen mit  $\alpha'$  und  $f_s'$  nicht der Fall. Im Frequenzbereich unterhalb 100 Hz werden die größten Einfügungsdämpfungen erreicht. Eine größere Filterlänge  $N'$  bewirkt keine größere Dämpfung im tiefen Frequenzbereich.

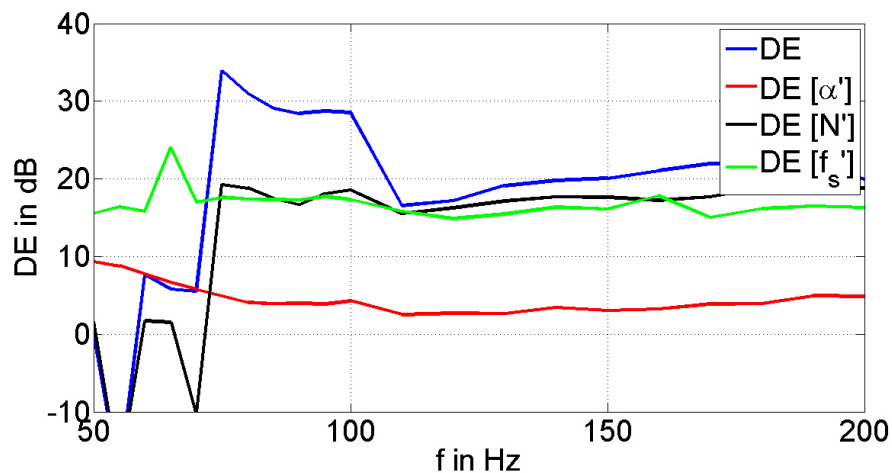


Abbildung 24: Spektrale Einfügungsdämpfung bis  $f = 200$  Hz am Fehlermikrofon bei den Grundeinstellungen und bei Variation von  $\alpha$ ,  $N$  und  $f_s$ , Störsignal: Sinus

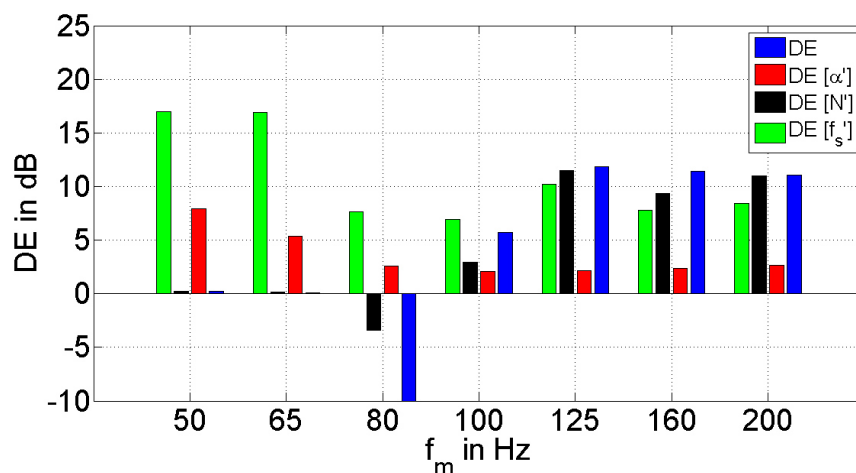
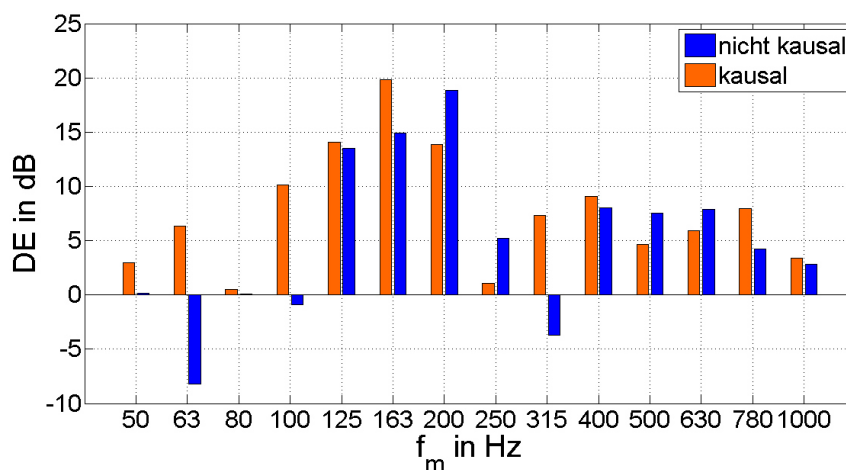


Abbildung 25: Spektrale Einfügungsdämpfung bis  $f = 200$  Hz am Fehlermikrofon bei den Grundeinstellungen und bei Variation von  $\alpha$ ,  $N$  und  $f_s$ , Störsignal: Terzrauschen

#### 4.2.4 Variation der Mikrofonabstände

Aufgrund der höheren Dämpfungswirkung im tiefen Frequenzbereich bei Halbierung der Abtastfrequenz wurde untersucht, ob eine Abstandsvergrößerung zwischen Fehler- und Referenzmikrofon einen ähnlichen Effekt hat. Der Abstand zwischen beiden Mikrofonen wurde so verändert, dass das System die nach Kuo [1999] geforderte Kausalität für breitbandige Störgeräusche erfüllt (Abschnitt 3.3). Die dazu notwendige Verzögerungszeit des Systems lässt sich aus den  $\hat{S}(z)$ -Filterkoeffizienten im eingeschwungenen Zustand abschätzen (Anlagen, Abbildung 40). Bei einer Verzögerung um 16 Filtertaps ergibt sich bei einer Abtastfrequenz von 8 kHz ein Mindestabstand der Mikrofone von ca. 70 cm.

Abbildung 26 zeigt die Vergleichsmessung für Terzrauschen bei einem Mikrofonabstand von ca. 40 cm (nicht kausal) und ca. 80 cm (kausal). Zu erkennen ist, dass durch den größeren Abstand für Frequenzen unterhalb von 200 Hz größere Einfügungsdämpfungen erreicht werden, als bei dem kleineren Abstand. Für höhere Frequenzen wird keine höhere Dämpfung erreicht.



**Abbildung 26: Vergleich der spektralen Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon mit und ohne Einhaltung der Kausalitätsbedingung, Störsignal: Terzrauschen**

Abbildung 27 zeigt die Einfügungsdämpfung zwischen 50 und 200 Hz für Sinustöne bei einem Mikrofonabstand von 80 cm. Der größere Mikrofonabstand führt dazu, dass die Dämpfung zwischen 50 und 100 Hz nicht einbricht, wie es bei einem Abstand von 40 cm (Abbildung 14) der Fall ist. Bei einer Frequenz von 50 Hz beträgt die Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon 10 dB.

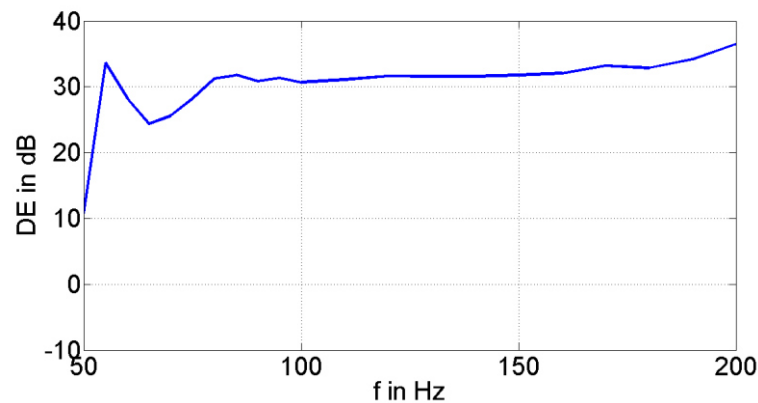


Abbildung 27: Spektrale Einfügungsdämpfung bis  $f = 200$  Hz am Fehlermikrofon unter Einhaltung der Kausalitätsbedingung, Störsignal: Sinus

#### 4.2.5 Optimierung des ANC-Systems für Motorgeräusch

Im Folgenden wurden Messungen mit einem Motorgeräusch bei Variation der Parameter Vergessensfaktor  $\alpha$ , Filterlänge  $N$ , Abtastfrequenz  $f_s$  und des Konvergenzparameters  $\mu_s$  durchgeführt. Des Weiteren wurde der Mikrofonabstand variiert und eine Kombination aus aktiven und passiven Schalldämpfer untersucht. Als Störsignal diente das Geräusch eines Notstromaggregats. Dieses emittiert im Bereich zwischen ca. 30 - 300 Hz die meiste Schallenergie (Anlagen, Abbildung 37). Bei den nachfolgenden Messungen wurde das Signal so verstärkt, dass sich ein Gesamtschalldruckpegel von ca. 70 dB(A) in 1 m Abstand ergab (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 28 zeigt die gemessenen Einfügungsdämpfungen. Für den geringeren Mikrofonabstand ergibt sich bei den Grundeinstellungen und bei  $\mu_s'$  (entspricht einer Verdoppelung der Schrittweite) keine Einfügungsdämpfung.

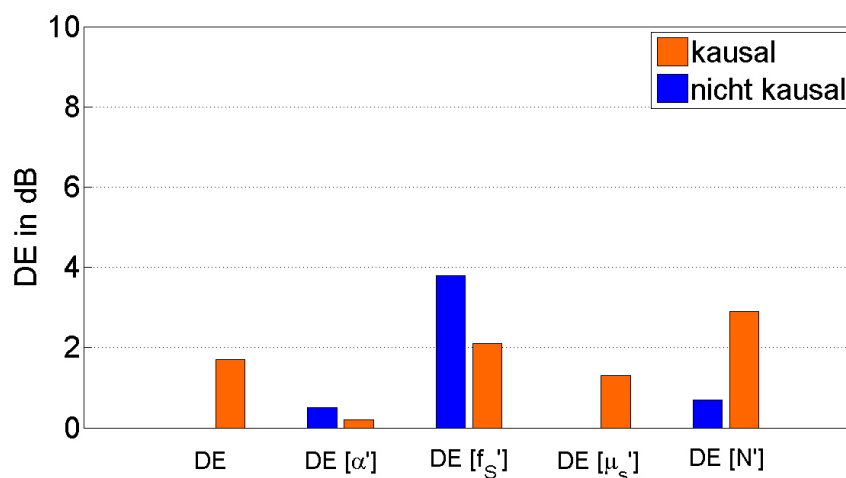
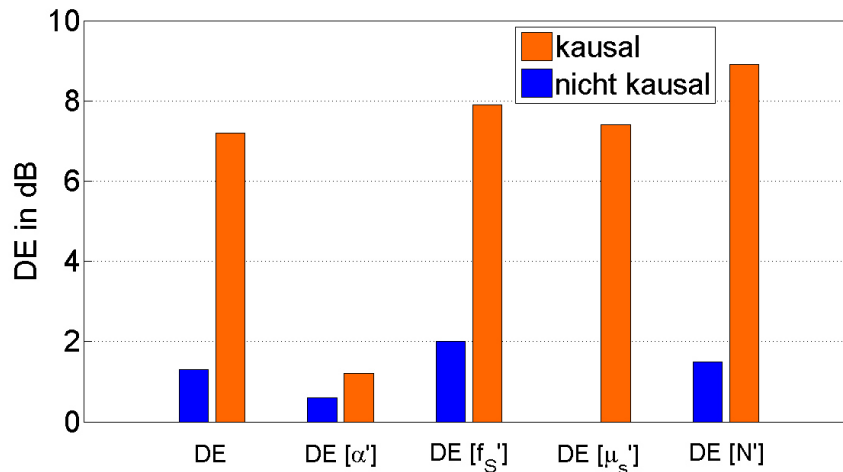


Abbildung 28: Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon bei verschiedenen Einstellungen, Motorgeräusch

Um die Dämpfung des ANC-Systems zu erhöhen, wurde eine Kombination aus aktiven und passiven Schalldämpfer untersucht. Dazu wurde vor das ANC-System ein Absorptionsschalldämpfer (Anlagen, Abbildung 41) gebracht. Die Einfügungsdämpfungen dieser Kombination zeigt Abbildung 29. Durch die Integration des passiven Schalldämpfers erhöht sich die Dämpfungswirkung durch das ANC-System. Bei einem Mikrofonabstand von 80 cm werden vergleichsweise hohe Einfügungsdämpfungen erreicht.



**Abbildung 29: Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon bei verschiedenen Einstellungen mit vorgeschaltetem Absorptionsschalldämpfer, Motorgeräusch**

Durch Verwendung eines passiven Schalldämpfers und einem Mikrofonabstand von 80 cm wurde eine maximale Einfügungsdämpfung von 11,6 dB am Fehlermikrofon gemessen. Dazu wurde  $\alpha$ ,  $f_s$ ,  $\mu_s$  und  $N$  in geeigneter Weise kombiniert. Für diesen Fall ist das Zeitsignal nach der Einschwingphase und die dazugehörige spektrale Minderung in Abbildung 30 bzw. Abbildung 31 dargestellt. Das System ist im Zeitbereich stabil. Die dominierenden Pegelspitzen bei 110 Hz und 140 Hz werden durch das ANC-System um mehr als 20 dB gedämpft. Eine breitbandige Minderung über den gesamten Frequenzbereich gibt es nicht.



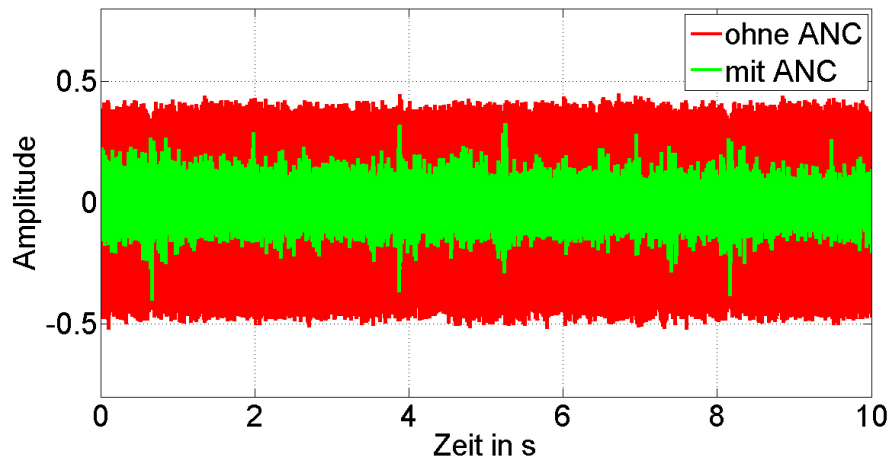


Abbildung 30: Ausschnitt des Signals am Fehlermikrofon bei Einstellung mit größter Einfügungsdämpfung, Motorgeräusch

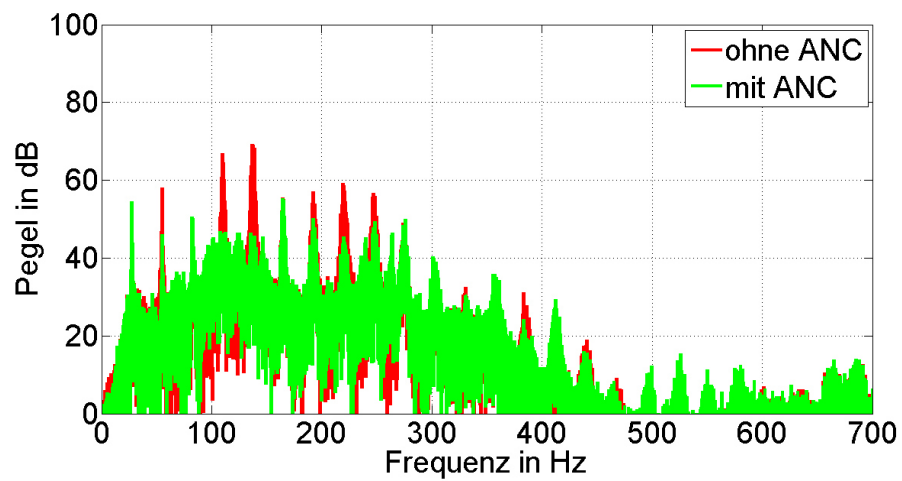


Abbildung 31: Spektrale Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon bei Einstellung mit größter Einfügungsdämpfung, Motorgeräusch



## 5 Diskussion

### Die Einfügungsdämpfung als Maß für die Wirksamkeit des ANC-Systems

Um die Wirksamkeit des ANC-Systems bewerten zu können, wurde die Einfügungsdämpfung am Ort des Fehlermikrofons gemessen. Es wurde angenommen, dass sich eine Pegelminderung am Fehlermikrofon ebenso im Raum zeigen lässt. Wie in Abbildung 18 gezeigt, ist der qualitative Verlauf der Einfügungsdämpfung am Fehlermikrofon und im Raum etwa gleich. Durch die Angabe eines Einzahlwertes lässt sich jedoch keine Aussage über die spektrale Minderung oder über die Stabilität des Systems geben. Um eine Aussage darüber zu erhalten sind Spektralanalysen und die Aufnahme von Zeitsignalen unverzichtbar.

### Die Position des Fehlermikrofons

In den Messungen mit dem modifizierten Impedanzrohr (Abschnitt 4.1) konnte kein signifikanter Einfluss der Position des Fehlermikrofons auf die Einfügungsdämpfung gezeigt werden. Aus Gründen der einfachen und kompakten Bauweise des aktiven Schalldämpfers wurde daher das Fehlermikrofon direkt vor dem Sekundärlautsprecher positioniert. Der Abstand von Lautsprecher zu Fehlermikrofon beträgt ca. 20 cm. Ein negativer Einfluss bei tiefen Frequenzen aufgrund der Nähe zur Lautsprechermembran wurde nicht festgestellt. Durch den kurzen Abstand wird zudem der Einfluss des Sekundärpfades (Abbildung 8) gering gehalten. Dessen Verzögerung durch den zurückzulegenden Weg vom Lautsprecher zum Fehlermikrofon ist verglichen mit den anderen Fehlermikrofonpositionen am kleinsten.

### Der Einfluss der Verstärkung der Kanäle

Bei allen durchgeführten Messungen wurden jeweils beide Kanäle (Primär- und Sekundärschallquelle) mit der gleichen Verstärkung betrieben. Es hat sich gezeigt, dass die erreichten Einfügungsdämpfungen von der Verstärkung der Kanäle abhängig sind. Bei einer größeren Verstärkung wurde die Dämpfungswirkung geringer. So unterscheiden sich z.B. die Einfügungsdämpfungen für Terzrauschen in Abbildung 18 und Abbildung 25 um bis zu 10 dB, wobei der Unterschied der Verstärkung bei ca. 25 % lag. Eine Erhöhung der Verstärkung bedeutet für den implementierten Adaptionsalgorithmus eine höhere Eingangssignalleistung. Eine mögliche Begründung für die niedrigere Dämpfung ist die nach (3.5.8) kleiner werdende Schrittweite bei steigender Eingangssignalleistung. Durch eine kleinere Schrittweite erhöht sich die Amplitude des Fehlersignals im eingeschwungenen Zustand (Anlagen, Abbildung 42). Der Vorteil einer kleineren Schrittweite ist, dass die Stabilität des Algorithmus erhöht wird. Das gilt insbesondere für hohe Leistungen des Eingangssignals.

Bei den Messungen mit dem Motorgeräusch wurden die Kanäle stets gleich verstärkt, sodass sich die Einfügungsdämpfung qualitativ und quantitativ vergleichen lassen.

### Das Problem stehender Wellen

Bei den Messungen mit dem modifizierten Impedanzrohr waren unter Verwendung verschiedener Mikrofonpositionen keine Dämpfungseinbrüche oberhalb von 100 Hz festzustellen. Jedoch traten Dämpfungseinbrüche bei den Messungen mit dem aktiven Schalldämpfer bei Sinustönen und Terzrauschen auf. Die Dämpfungseinbrüche am Fehlermikrofon mit einem Sinus-Störgeräusch (Abbildung 14) liegen in Frequenzbereichen, in denen nicht genügend Schalldruck von der Primärquelle am Referenzmikrofon oder von der Sekundärquelle am Fehlermikrofon erzeugt wird (Abbildung 15 und Abbildung 16). Der Grund dafür ist das Auftreten stehender Wellen, in deren Knotenpunkt sich das jeweilige Mikrofon befindet. Die Simulation der Wellenausbreitung am Beispiel einer Frequenz von 315 Hz bestätigt dies (Abbildung 19). Auch bei dem modifizierten Impedanzrohr können stehende Wellen auftreten. Im Unterschied zum aktiven Schalldämpfer befindet sich an einem Rohrende Absorptionsmaterial, wodurch dem Schallfeld im Rohr Energie entzogen wird. Das ist eine mögliche Erklärung dafür, weshalb es zu keinen größeren Dämpfungseinbrüchen kommt. Für den praktischen Einsatz ist auf die Beschaffenheit des stehenden Wellenfeldes entsprechend des Rohrabschlusses zu achten. Die Mikrofone sollten sich nicht in Knotenpunkten von Wellen befinden, deren Frequenzen das Spektrum des Primärschallfeldes dominieren. Befindet sich der aktive Schalldämpfer vor der Mündungsöffnung, dürfen die Mikrofone nicht in einem Abstand von Vielfachen der halben Wellenlänge zur Mündungsöffnung positioniert werden.

### Die Optimierung für tiefe Frequenzen

Bei Messungen mit einem Mikrofonabstand von 40 cm und mit den Grundeinstellungen der Parameter  $\alpha$ ,  $N$ , und  $f_s$  konnte keine Minimierung des Signals am Fehlermikrofon erreicht werden. Ein innerhalb des Algorithmus programmierter Tiefpass-Filter (Anlagen, Abbildung 34) für das Referenz- und Fehlersignal zeigte keine positive Wirkung. Durch das Filter wurde das System teilweise instabil (Anlagen, Abbildung 38). Durch eine Vergrößerung des Mikrofonabstandes von 40 auf 80 cm wurden vergleichsweise hohe Einfügungsdämpfungen im Frequenzbereich unterhalb von 200 Hz erreicht. Das ANC-System gewann dadurch außerdem an Stabilität. Durch den größeren Mikrofonabstand erfüllt das ANC-System die Kausalitätsbedingung nach Kuo [1999]. Ist diese nicht erfüllt, lassen sich nur schmalbandige oder periodische Signale mindern. Bei den Messungen mit dem tiefrequenten Motorgeräusch in Abschnitt 4.2.5 wurde bei Erfüllung der Kausalitätsbedingung die Dämpfung erhöht. Mögliche instationäre Anteile des Geräuschs können durch die längere Rechenzeit gemindert werden. Da der größere Mikrofonabstand jedoch auch dazu führte, dass Einfügungsdämpfungen für Sinustöne unterhalb von 75 Hz erreicht wurden (Abbildung 27), spielt ein Zeitproblem der DSV-Einheit möglicherweise eine untergeordnete Rolle. Der positive Effekt bei der Vergrößerung des Mikrofonabstandes wurde besonders bei der Kombination aus aktiven- und passiven Schalldämpfer deutlich. So

hat eine Variation der einzelnen Parameter nur einen geringen Einfluss auf die Dämpfung eines Motorgeräuschs durch das ANC-System, verglichen mit der Aktiv-Passiv-Kombination bei einem größeren Mikrofonabstand (Abbildung 28 und Abbildung 29). Der vorgeschaltete Absorptionsschalldämpfer wirkt dabei als Tiefpass-Filter. Das Signal am Referenzmikrofon besitzt dadurch eine geringere Bandbreite, weshalb die Dämpfungswirkung durch das ANC-System erhöht wird.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit, einen Demonstrator zur aktiven Schallminderung für tieffrequente Motorgeräusche zu entwickeln, wurde erreicht.

Es wurden verschiedene Mikrofonpositionen innerhalb des Rohres hinsichtlich der Stabilität und der Dämpfungswirkung des Systems untersucht. Dabei befand sich das Fehlermikrofon direkt vor dem Sekundärlautsprecher. Es konnte festgestellt werden, dass der Abstand zwischen Referenz- und Fehlermikrofon im ANC-System eine wichtige Rolle spielt. Die Stabilität und die Einfügungsdämpfung werden mit einem größeren Mikrofonabstand von 80 cm, gegenüber einem Abstand von 40 cm, deutlich erhöht. Bei tonalen Störgeräuschen ist darauf zu achten, dass sich die Mikrofone außerhalb von Knotenpunkten stehender Wellen befinden.

Weiterhin wurde der Einfluss einer Variation von Schrittweite, Filterlänge, Vergessensfaktor und Abtastfrequenz auf die Dämpfungswirkung untersucht. Im Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz dämpft das ANC-System durch eine geringere Abtastfrequenz deutlich mehr. Bei einzelnen Sinustönen und bandbegrenztem Rauschen ist der Einfluss der Parameter größer, als bei einem realen Motorgeräusch. Die Messungen mit dem Geräusch eines Notstromaggregats haben gezeigt, dass vor allem durch den vorgeschalteten passiven Schalldämpfer in Verbindung mit dem größeren Mikrofonabstand hohe Pegelminderungen erreicht werden. Durch eine geeignete Kombination der Parameter lässt sich die Dämpfung anschließend noch etwas erhöhen.

Die Temperatur- und Kondensatfestigkeit der ANC-Komponenten konnte im zeitlichen Rahmen der Arbeit nicht getestet werden. Es ist davon auszugehen, dass der Lautsprecher durch seine robuste Aluminium-Membran und durch die Lochblechabdeckung dem geforderten Dauertemperaturbereich von 120°C im Abgasstrang standhält. Der Hitzeschutz der Mikrofone kann durch Sonden erfolgen.

Im Hinblick auf ein kommerzielles Produkt ist die Umsetzung eines aktiven Schalldämpfersystems für breitbandige Motorgeräusche als Hybridschalldämpfer sinnvoll. Um hohe Einfügungsdämpfungen und ein hohes Maß an Stabilität zu erreichen, sollte eine genaue Abstimmung des aktiven und des passiven Schalldämpfers aufeinander erfolgen.





## Literatur

- [DEGA, 2006] DEGA-Empfehlung 101. Akustische Wellen und Felder, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin, 2006
- [EN ISO 14163] Norm EN ISO 14163. Leitlinien für den Schallschutz durch Schalldämpfer, 1998
- [Grünigen, 2014] von Grünigen, D.: Digitale Signalverarbeitung mit einer Einführung in die kontinuierlichen Signale und Systeme, 5. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2014
- [Henn, 2008] Henn, H.; Sinambari, G.; Fallen, M.: Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele, 4. Auflage, Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, 2008
- [Hirayama, 2009] Hirayama, R.; Kajikawa, Y.: Stability Improvement of Feedback Active Noise Control System Using Linear Prediction, Faculty of Engineering Science, Kansai University, 09-0102300233, 2009
- [Kluth, 2014] Kluth, S.; Schulze, C.: Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Entwicklung eines Schallablenksystems zur aktiven Lärmminde- rung (SAS), Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, Be- richt 120290073602, unveröffentlicht, 2014
- [Kuo, 2008] Kuo, S.; Morgan, D.: Active Noise Control, In Benesty, J.; Sondhi, M.; Huang, Y., Hrsg.: Springer Handbook of Speech Processing, Kapitel 49, Seiten 1001-1017, Berlin, Springer-Verlag, 2008
- [Kuo, 1999] Kuo, S.; Morgan, D.: Active Noise Control: A Tutorial Review, Pro-

ceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 6, 1999

- [Meyer, 2011] Meyer, M.: Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter, 6. Auflage, Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [Moschytz, 2000] Moschytz, G.; Hofbauer, M.: Adaptive Filter: Eine Einführung in die Theorie mit Aufgaben und MATLAB-Simulationen auf CD-ROM, Berlin, Springer-Verlag, 2000
- [Möser, 2012] Möser, M.: Technische Akustik, 9. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, 2012
- [Müller, 2004] Müller, G.; Möser, M.: Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 2004
- [Schirmer, 2006] Schirmer, W.: Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 2006
- [Schubert, 2011] Hübelt, J.; Schubert, S.: Minderung des Verkehrslärms durch den Einsatz aktiver Lärmschutzwände für Anwendung im Straßen- und Schienenverkehr, Hochschule Mittweida, AZ 4-7531.60-02-5140-09/4, 2011
- [Schulze, 2014] Hübelt, J.; Schulze, C.: Lärminderung bei Mikro-BHKW (SILENA-Studie), Landesamt für Umwelt, Geologie und Landwirtschaft, Schriftenreihe, Heft 8/2014
- [Trimpop, 2003] Trimpop, M.: Grundlagen zur Auslöschung von Schallfeldern durch Antischall unter Verwendung eines zweidimensionalen Ansatzes, Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2003

---

[Weinzierl, 2008] Weinzierl, S.: Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Springer-Verlag, 2008



## Anlagen, Teil 1: ANC-System

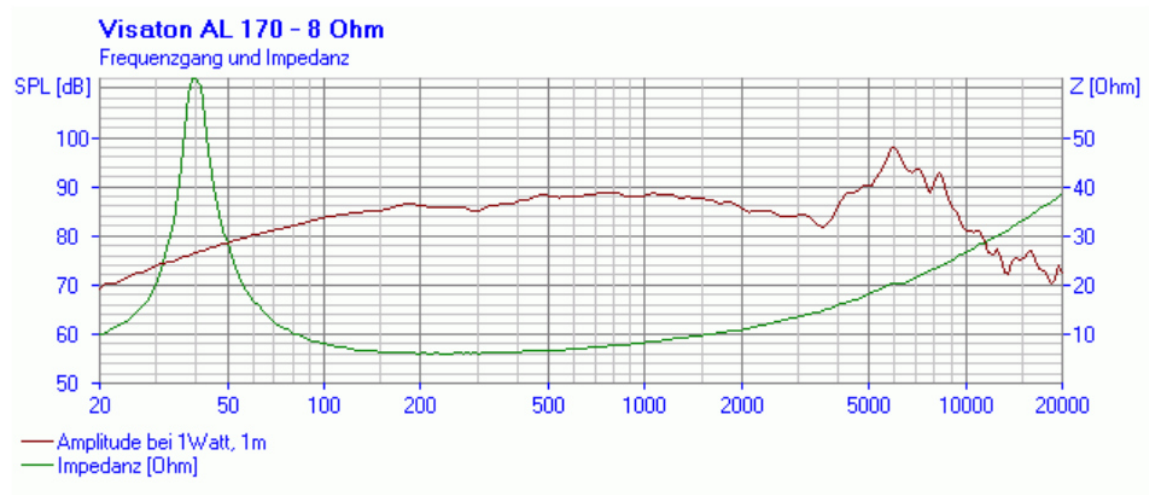


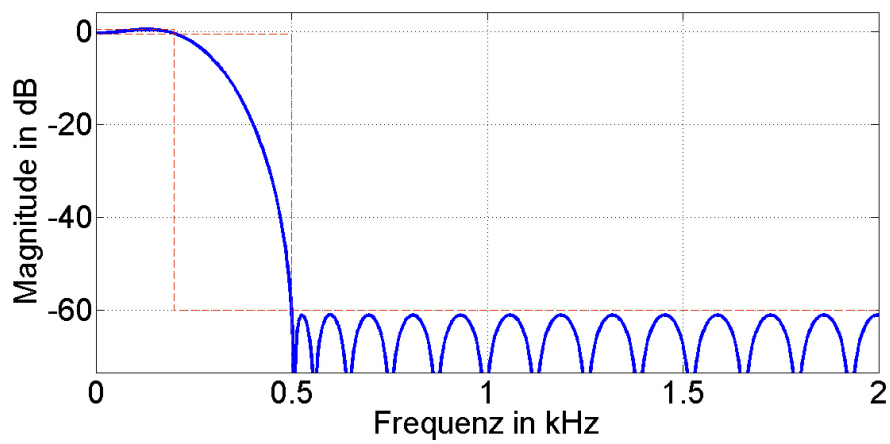
Abbildung 32: Frequenzgang und Impedanz des ANC-Lautsprechers



Abbildung 33: Aktiver Schalldämpfer

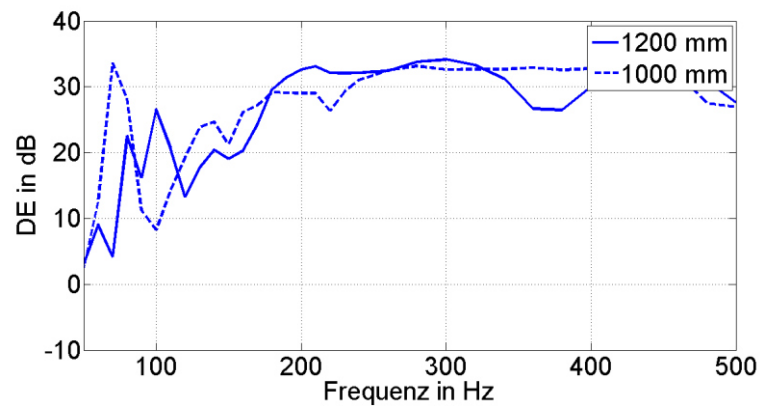
Algorithmus Eigenschaft	LMS	NLMS	FXLMS	NFXLMS
Konvergenzparameter	fest	variabel	fest	variabel
Nachführverhalten	schlecht	gut	schlecht	gut
Rechenaufwand (hier: Anzahl reeller Multiplikationen)	$2N+1$	$3N+1$	$4N+1$	$5N+1$
Stabilität	schlecht	schlecht	mittel	gut

**Tabelle 1: Gegenüberstellung der Eigenschaften der untersuchten Algorithmen [Kluth, 2014]**

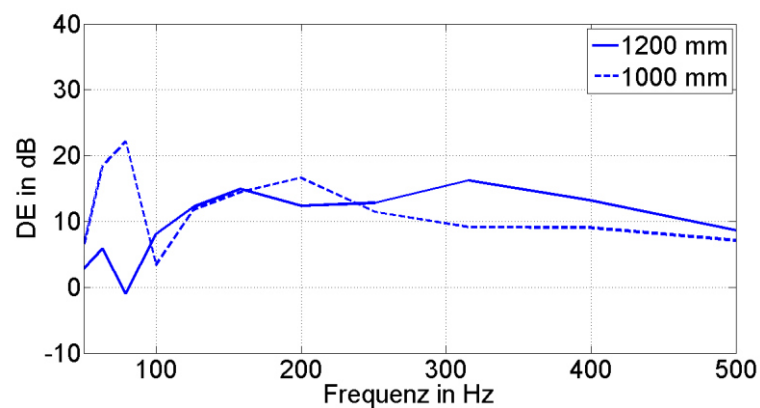


**Abbildung 34: Amplitudengang des innerhalb des Algorithmus programmierten Tiefpasses**

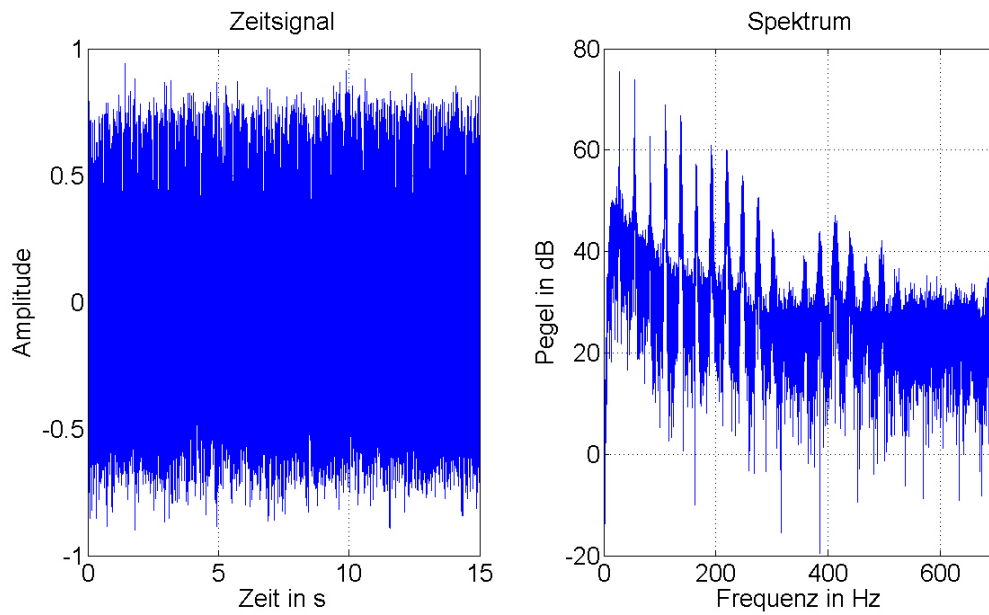
## Anlagen, Teil 2: Weitere Messungen



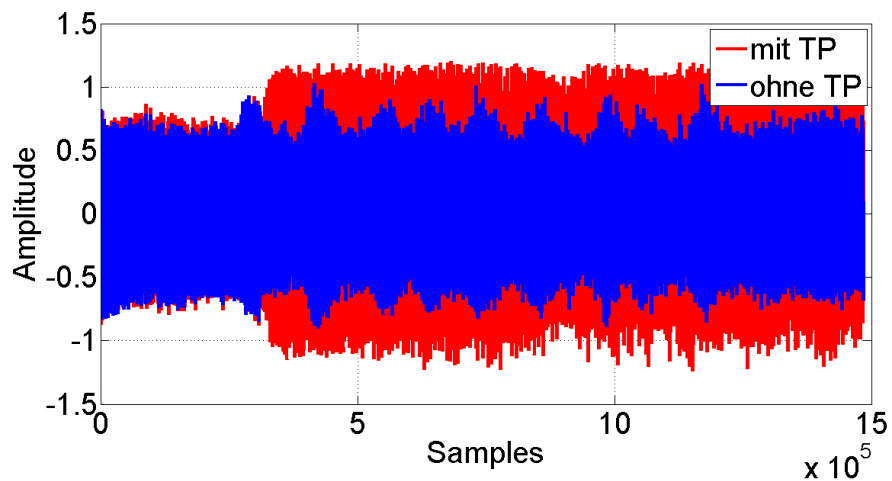
**Abbildung 35:** Vergleich der Einfügungsdämpfungen mit und ohne Mittelstück im modifizierten Impedanzrohr, Referenzmikrofon an R2, Fehlermikrofon an E1, Störgeräusch: Sinus



**Abbildung 36:** Vergleich der Einfügungsdämpfungen mit und ohne Mittelstück im modifizierten Impedanzrohr, Referenzmikrofon an R2, Fehlermikrofon an E1, Störgeräusch: Terzrauschen

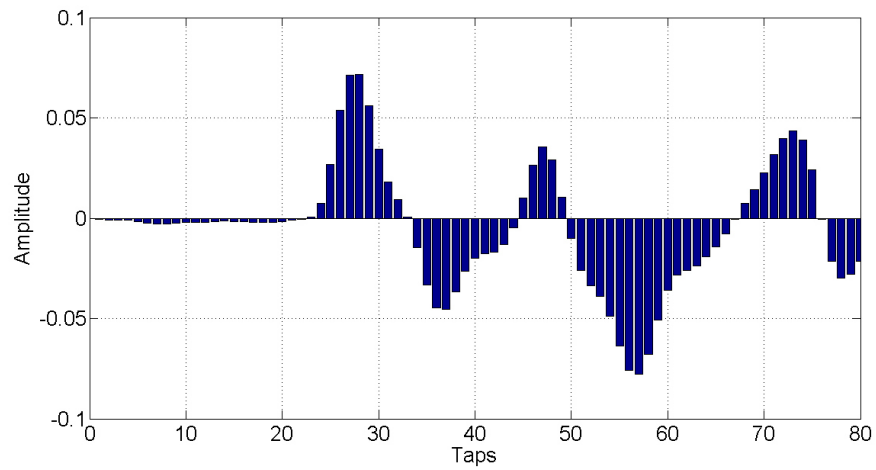
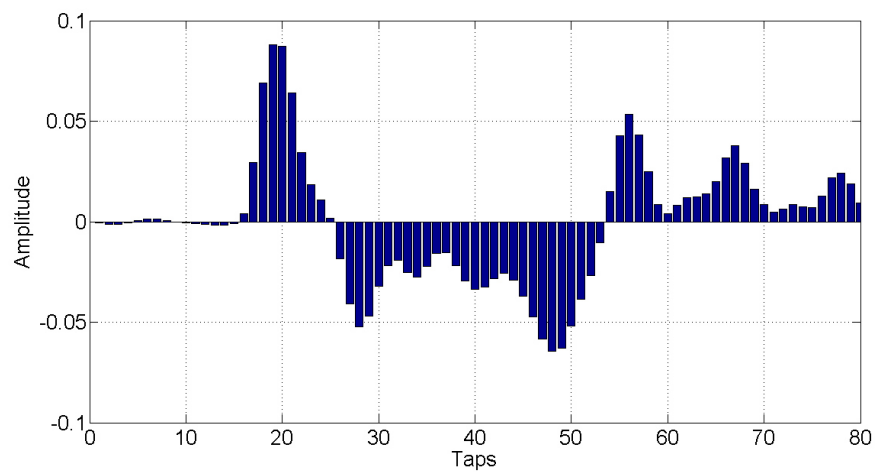
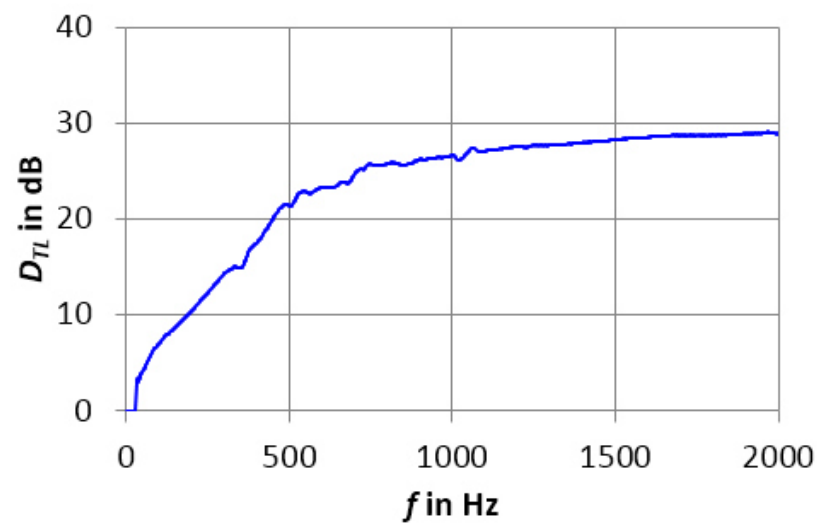


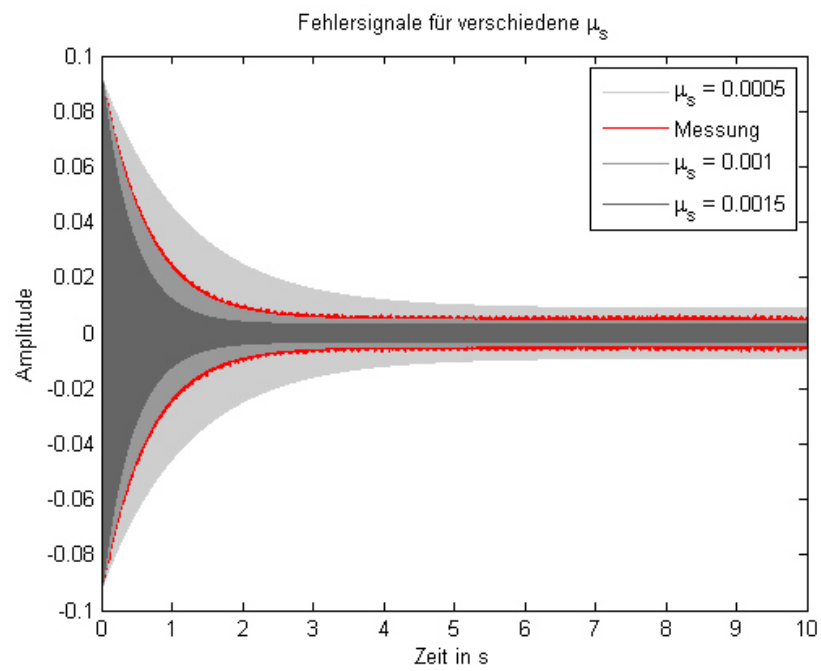
**Abbildung 37: Zeitsignal und Spektrum des aufgenommenen Motorgeräuschs**



**Abbildung 38: Signal am Fehlermikrofon mit und ohne algorithmisch realisiertem Tiefpass-Filter, Motorgeräusch**



**Abbildung 39:  $F(z)$  – Koeffizienten im eingeschwungenen Zustand****Abbildung 40:  $S(z)$  - Koeffizienten im eingeschwungenen Zustand****Abbildung 41: Durchgangsdämpfung des passiven Schalldämpfers**



**Abbildung 42: Simulation des Fehlersignals bei Variation des Konvergenzparameters  $\mu_s$**   
**Störgeräusch: Sinus, Quelle: Praktikumsbericht Tom Georgi**

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde bei der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH angefertigt.

An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die mich während des Studiums und besonders während der Bachelorarbeitszeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt für die wissenschaftliche Betreuung und Übernahme des Gutachtens seitens der Hochschule Mittweida sowie Herrn Dipl.-Ing. Christian Schulze für die Übernahme des Gutachtens seitens des Unternehmens.

Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Kluth danke ich sehr für seine kompetente Betreuung, die aufschlussreichen Diskussionen und die gute Zusammenarbeit.

Zudem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH bedanken, welche mich bei Problemen und Fragen unterstützt haben und für fachliche Diskussion stets zur Verfügung standen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, welche in allen Lebenslagen für mich da sind.



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 10.10.2014

Tom Georgi